

304 不锈钢的高温单轴应变循环与棘轮行为*

杨显杰 康国政 高庆 孙亚芳

(西南交通大学应用力学研究所, 成都 610031)

摘要 对 304 不锈钢分别进行了高温单轴应变控制和应力控制下的系统循环试验. 揭示和分析了循环应变幅值、应变幅值历史以及温度历史对循环特性的影响以及应力幅值、平均应力及其历史对循环蠕变(棘轮效应)的影响. 研究表明, 无论单轴应变循环特性还是非对称单轴应力下的棘轮效应不但依赖于当前温度和加载状态, 而且依赖于其加载历史. 得到 304 不锈钢高温单轴循环行为的一些有意义的结果.

关键词 304 不锈钢, 高温, 棘轮效应, 循环塑性

中图分类号 V214.32, O344.3, TG142.71 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(1999)07-0698-05

ON CYCLIC STRAIN BEHAVIOR AND RATCHETTING OF 304 STAINLESS STEEL UNDER UNIAXIAL LOADING AT HIGH TEMPERATURE

YANG Xianjie, KANG Guozheng, GAO Qing, SUN Yafang

Institute of Applied Mechanics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Correspondent: KANG Guozheng, lecturer, Tel: (028)7601287, Fax: (028)7600797,

E-mail: chpeng@center2.swjtu.edu.cn

Manuscript received 1999-01-14, in revised form 1999-04-12

ABSTRACT An experimental study was carried out of the cyclic properties of 304 stainless steel subjected to uniaxial strain and stress at high temperature. The effects of cyclic strain amplitude, temperature and their histories on the cyclic deformation behavior of 304 stainless steel were investigated, and the influences of stress amplitude, mean stress, temperature and their histories on the cyclic creep (*i.e.*, ratchetting) were also analyzed. It is shown that either uniaxial cyclic property under cyclic strain or ratchetting under asymmetric uniaxial cyclic stress depends not only on the current temperature and loading state, but also on the previous loading history. Some significant results were obtained.

KEY WORDS 304 stainless steel, high temperature, ratchetting, cyclic plasticity

许多承受高温荷载的结构, 如快中子增殖反应堆元件, 受到瞬态热载荷作用, 这些结构在非对称应力循环下将产生循环蠕变, 这种变形的循环累积现象称为棘轮行为 (ratchetting). 这种棘轮行为在纯应变控制下是表现不出来的. 对工程实际中受非弹性变形作用的构件来讲, 要防止棘轮行为的产生是非常困难的. 在非对称循环载荷作用下, 结构可能无限制的变形而导致不能接受的累积大应变, 这种因载荷循环而不断增加的变形将导致材料的破坏. 为了建立能较精确地估计结构的累积变形的本构模型, 必须对材料的高温棘轮

变形行为进行系统深入的研究. 若干年以来, 不少学者开展了对材料的应变循环特性和棘轮效应的研究, 取得了一些进展^[1-7]. 由于棘轮行为的高温加载历史依赖性研究仍很不深入, 要全面揭示材料的棘轮行为还需要进行大量深入的研究. 本文报道了对 304 不锈钢分别进行高温单轴应变和应力控制下的循环试验, 揭示该材料的一些高温单轴应变循环特性以及棘轮行为, 为后续本构模型的建立提供了坚实的实验基础.

1 实验方法

本文采用的试验材料为 304 不锈钢, 其成分(质量分数, %)为: C 0.03, Ni 9.8, Cr 18.0, Mn 1.7, P<0.05, S<0.05.

将不锈钢棒热锻后经 1150 °C 保温 60 min 再水冷, 即固溶处理后加工成单轴实心圆棒试样. 实心圆棒中心标距段

* 国家自然科学基金 19772041 和四川省跨世纪青年学科带头人培养基金资助项目

收到初稿日期: 1999-01-14, 收到修改稿日期: 1999-04-12

作者简介: 杨显杰, 男, 1964 年生, 教授, 博士

的直径为 10 mm. 通过 Lepel 感应加热装置对试样加热. 应变测量通过在实心圆棒外表面安装标距为 25 mm 的高温拉扭引伸仪进行测量, 在 MTS 809-250 kN 电液伺服控制试验机上通过 Teststar 试验控制系统对整个试验过程进行闭环控制数据采集. σ 和 ε 分别代表轴向应力和应变, σ_a 表示循环应力幅值, N 表示循环周次, ε_r 代表棘轮应变. 应力控制循环中滞后环一般都不是完全封闭的, 本文定义棘轮应变

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}) \quad (1)$$

式中, ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为一个循环中最大及最小应变值. 棘轮应变率定义为 $d\varepsilon_r/dN$, 即每一个加载循环下棘轮应变 ε_r 的增量.

2 高温单轴应变循环特性分析

2.1 高温单轴应变循环的应变幅值及其历史依赖性

本文进行了四种温度下的单轴应变幅值循环历史试验, 加载速率为 $2 \times 10^{-3}/s$, 应变幅值历史分别为:

- (1) 300 °C: 0.30%(40 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.60%(20 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.30%(20 cyc);
- (2) 400 °C: 0.30%(40 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.60%(20 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.30%(20 cyc);
- (3) 600 °C: 0.30%(40 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.50%(20 cyc)→0.60%(20 cyc)→0.50%(20 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.30%(10 cyc);
- (4) 700 °C: 0.30%(40 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.60%(20 cyc)→0.40%(20 cyc)→0.30%(20 cyc).

其 $\sigma_a - N$ 关系如图 1 所示.

从图可以看出: (1) 304 不锈钢在高温下, 开始时都表现出循环硬化特性. 然而, 在相同应变幅值下, 不同温度的循环应力幅值明显不同, 温度越高, 应力幅值越小. 由此可见,

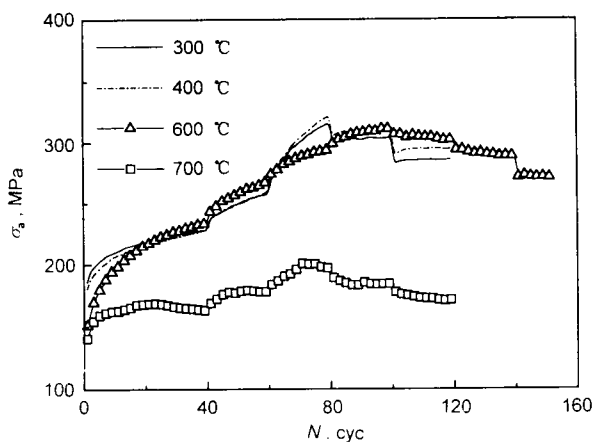


图 1 四种温度下循环时的 $\sigma_a - N$ 关系曲线

Fig.1 Diagram of σ_a vs N under four kinds of temperature values

高温单轴应变循环有明显的温度依赖性. (2) 当应变幅值增大时, 材料表现为进一步的循环硬化, 随着应变幅值增大, 其应力幅值也增大; 当应变幅值从 0.60% 下降时, 材料的应力幅值明显下降, 出现了循环软化. (3) 当在第二个 0.30%(或 0.40%, 0.50%) 应变幅值下材料大致循环饱和时, 其循环饱和和应力幅值较先前的第一个 0.30%(或 0.40%, 0.50%) 幅值下的应力幅值大. 这是由于先前历史中有了 0.60% 应变幅值循环的缘故, 这说明该材料对先前 0.60% 应变幅值下的循环行为具有明显的记忆效应. 值得注意的是, 在不同的环境温度下, 第一个 0.30%(或 0.40%, 0.50%) 幅值下和第二个 0.30%(或 0.40%, 0.50%) 幅值下的应力幅值的差别不同, 在 700 °C 时这种差别已经很小. 由此表明, 该材料在不同温度下对先前 0.60% 应变幅值下的循环行为的记忆效应具有明显的温度依赖性.

2.2 高温单轴应变循环特性的温度历史效应

进行等效应变幅值为 0.60% 的应变循环试验, 温度梯度变化历史分别为:

- ① 300 °C → 700 °C → 300 °C;
- ② 400 °C → 600 °C → 400 °C.

在每一温度下均循环 20 cyc, 加载速率同前, 其 $\sigma_a - N$ 关系如图 2 所示.

由图可知: (1) 当经历了较高温应变循环之后, 在较低温度下循环时, 其饱和应力幅值较未经历较高温时的相同温度下循环饱和时的应力幅值要大, 即先前较高温应变循环历史对后继较低温度应变循环行为有明显影响. 这表明 304 不锈钢具有明显的应变循环温度历史依赖性. (2) 在温度历程①中前后两个 300 °C 下的应力幅值之差要小于温度历程②中前后两个 400 °C 下的应力幅值之差. 这说明, 先前较高温应变循环历史对后继较低温度应变循环行为的影响随较高温度的不同而不同, 该温度值越高, 它对后续较低温度下的应变循环行为影响越小.

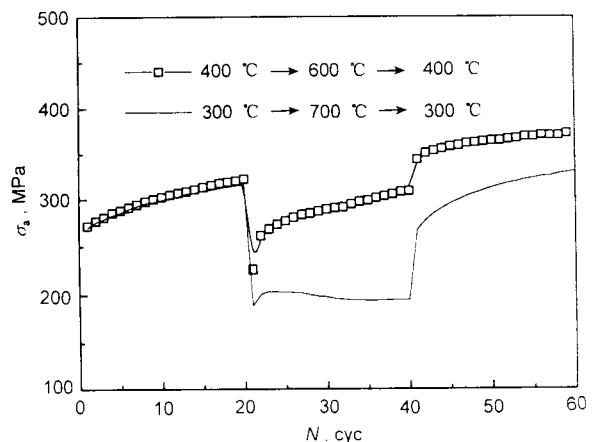


图 2 两种温度变化历史下循环时的 $\sigma_a - N$ 关系

Fig.2 Diagram of σ_a vs N under two kinds of temperature histories

3 高温单轴应力控制下的棘轮行为

3.1 高温单轴棘轮行为的平均应力及其历史效应

对 304 不锈钢试样进行了三种温度下的应力控制循环历史试验, 加载速率为 4 kN/s. 其棘轮应变 - 循环周次 ($\epsilon_r - N$) 关系如图 3 所示, 其应力循环历史见表 1.

从图 3 可以看出: (1) 在这三种温度下的加载情形①, 由于平均应力为零, 304 不锈钢没有产生棘轮变形. (2) 在应力幅值一定时, 随着平均应力的出现, 300 和 600 °C 下每一有平均应力的加载情形前一、二周次均产生了明显的棘轮应变, 但随平均应力值的增加, 棘轮应变率 $d\epsilon_r/dN$ 增大的幅度不明显; 而在 700 °C 时, 随着平均应力的增大, $d\epsilon_r/dN$ 却明显增大. 这说明平均应力对循环棘轮行为的影响还与环境温度有关. (3) 300 和 600 °C 时, 除了前二、三周次有明显的拉伸方向棘轮变形外, $d\epsilon_r/dN$ 很快趋于零; 而在 700 °C 时, $d\epsilon_r/dN$ 的衰减速度则比较缓慢. (4) 对于情形⑤, 在 300 °C 时, 尽管平均应力基本为零, 由于经历了较大平均应力的情形④, 沿压缩方向仍产生了微小的棘轮应变, 在循环几个周次后, $d\epsilon_r/dN$ 趋于零; 而 600 °C

下, 尽管平均应力为 26 MPa, 仍只是沿压缩方向产生了微小的棘轮应变并很快趋于稳定. 这说明在经过大平均应力的应力循环后, 小平均应力下的循环除第一、二周次外, 基本不产生明显的棘轮变形. (5) 对情形⑥, 在 300 °C 下, 尽管它的平均应力值与情形⑤相比有了一定的提高, 但仍小于先前已经历的最大平均应力值, 除了前二、三周次有一定的拉伸方向棘轮变形外, $d\epsilon_r/dN$ 很快趋于零; 而在 600 °C 下, 由于又达到了最大的平均应力值, 在循环开始的前几周次有较明显的棘轮应变, 而后 $d\epsilon_r/dN$ 趋于零.

通过上述实验结果分析可知, 304 不锈钢在高温下的应力控制循环下的棘轮行为具有明显的平均应力大小及其历史依赖性.

3.2 高温棘轮行为的应力幅值及其历史效应

进行恒定平均应力值下三种温度的高温棘轮行为的应力幅值及其历史的循环试验, 加载速率同前. 上述三种温度下的 $\epsilon_r - N$ 关系如图 4 所示, 其应力循环历史见表 2.

从图 4 可知: (1) 室温下, 在情形①, ②, ③时, 随着应力幅值的增加, $d\epsilon_r/dN$ 明显增加. 在每一加载情形, 随

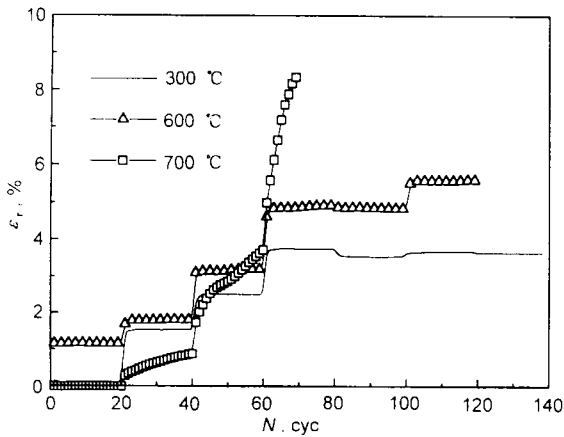


图 3 不同平均应力及其历史上三种温度的 $\epsilon_r - N$ 关系曲线

Fig.3 Diagram of ϵ_r vs N under different mean stresses and their histories at three kinds of temperature values

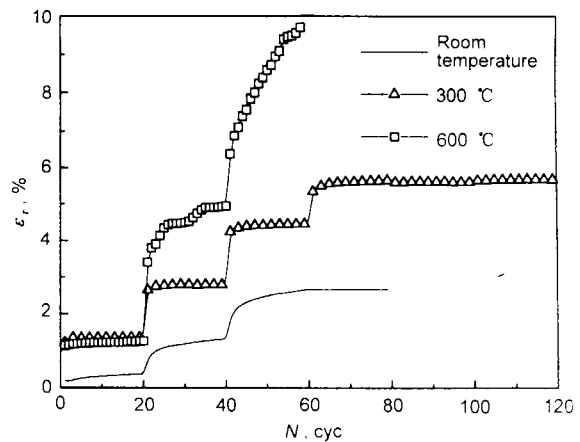


图 4 不同应力幅值及其历史上三种温度的 $\epsilon_r - N$ 关系曲线

Fig.4 Diagram of ϵ_r vs N under different stress amplitudes and their histories at three kinds of temperature values

表 1 不同平均应力及其历史上循环试验的加载条件

Table 1 The loading conditions of cycling tests under different mean stresses and their histories

Temperature, °C	(MPa)						
	Case ①	Case ②	Case ③	Case ④	Case ⑤	Case ⑥	Case ⑦
300	0±195	49±195	74±195	98±195	0±195	74±195	49±234
600	0±183	26±183	53±183	79±183	26±183	79±183	
700	0±102	26±102	52±102	77±102			

表 2 不同应力幅值及其历史上的循环试验条件

Table 2 The loading conditions of cycling tests under different stress amplitudes and their histories

Temperature	(MPa)					
	Case ①	Case ②	Case ③	Case ④	Case ⑤	Case ⑥
Room temperature	52±222	52±248	52±274	52±222		
300 °C	26±194	26±232	26±272	26±298	26±194	26±298
600 °C	38±128	38±180	38±205			

循环周次的增加, $d\epsilon_r/dN$ 都有明显的衰减. 情形④时, 其加载与情形①相同, 但由于已经历了情形①, ②, ③的循环, 尽管此时的平均应力和应力幅值都不小, 但棘轮应变的增量为零, 即 $d\epsilon_r/dN=0$. (2) 300 °C 时, 在情形①—④, 随着应力幅值的增加, $d\epsilon_r/dN$ 明显增加. 在情形①时, $d\epsilon_r/dN$ 在经历了一、二个周次后就趋于零. 情形②经历了十几周次时趋于零, 而情形③时在经历 20 cyc 后, $d\epsilon_r/dN$ 并未衰减为零. 情形⑤与情形④相比, 应力幅值有所减少, 此时除第一个周次外, $d\epsilon_r/dN=0$, 没有新的棘轮应变产生. (3) 600 °C 下, 情形①时, 应力幅值较小, $d\epsilon_r/dN$ 也很小. 当情形②, ③时, 由于应力幅值增大, $d\epsilon_r/dN$ 明显增大. 在各加载情形下, $d\epsilon_r/dN$ 随循环周次 N 的增大而衰减.

从上述三个试验温度下的棘轮效应试验可以看出, 304 不锈钢在恒定平均应力下的循环棘轮行为明显依赖于应力幅值大小, 且与应力幅值历史密切相关.

3.3 先前应变循环历史对后继棘轮行为的影响

本文在三种温度下进行了先前应变循环历史下的后继应力循环实验. 三种温度下的先前应变循环历史即为本文第 2.1 节对应温度的应变幅值历史, 而后继应力循环历史如表 3 所示.

上述试验的 $\epsilon_r - N$ 关系如图 5a 所示. 为了便于比较有无先前应变循环的区别, 图 5b 给出了 300 和 600 °C 下无先前应变循环的 $\epsilon_r - N$ 关系曲线. 由图可以看出: (1) 在 300 °C 下, 在没有先前循环历史时, 在经历了情形①—④后, ϵ_r 已达到 5%. 而有先前应变循环时, 在经历了情形①—④时, ϵ_r 才达到 0.3% 左右, 即使在情形⑤时循环 20 cyc 后 ϵ_r 仍只有 1.7% 左右, 远小于无先前应变循环时的 5%. 比较图 5a,b 还可以发现, 在无先前应变循环历史时, 每一加载循环的前一、二周次 $d\epsilon_r/dN$ 很大, 并很快衰减. 而经历了先前应变循环历史之后的应力循环后, 每一加载情形的 $d\epsilon_r/dN$ 衰减很慢. 对于 300 °C 有先前应变循环历史的应力循环, 应力幅值增加时, $d\epsilon_r/dN$ 也相应增加. (2) 600 °C 时, 将有应变幅值为 0.50%, 循环周次为 20 cyc 的先前应变循环与无先前应变循环时的应力循环历史时的 $\epsilon_r - N$ 关系进行比较可知, 无先前应变循环历史时在每一循环加载情形的 $d\epsilon_r/dN$ 都明显大于有先前应变循环历史时的 $d\epsilon_r/dN$, 无先前应变循环时在三种情形循环后, ϵ_r 达到 10% 左右, 而有先前应变循环时却为 3.0%, 这表明先前应变循环对材料的棘轮应变产生有明显的抑制作用. (3) 700 °C 时, 在经历了先前应变循环后, 在 (26 ± 127) MPa 和 (51 ± 127) MPa

表 3 有无先前应变循环时的应力循环试验条件

Table 3 The loading conditions of cycling tests with prior strain cycling or without prior strain cycling

Temperature °C	Initial status	(MPa)					
		Case ①	Case ②	Case ③	Case ④	Case ⑤	Case ⑥
300	A ¹⁾	26±191	26±231	26±268	26±294	26±320	-
	B ²⁾	26±194	26±232	26±272	26±298	26±194	26±298
600	A ¹⁾	39±131	39±184	39±208	39±232		
	B ²⁾	38±128	38±180	38±205			
700	A ¹⁾	26±127	51±127	0±127	51±127		
	B ²⁾	26±127					

1) with prior strain cycling, 2) without prior strain cycling

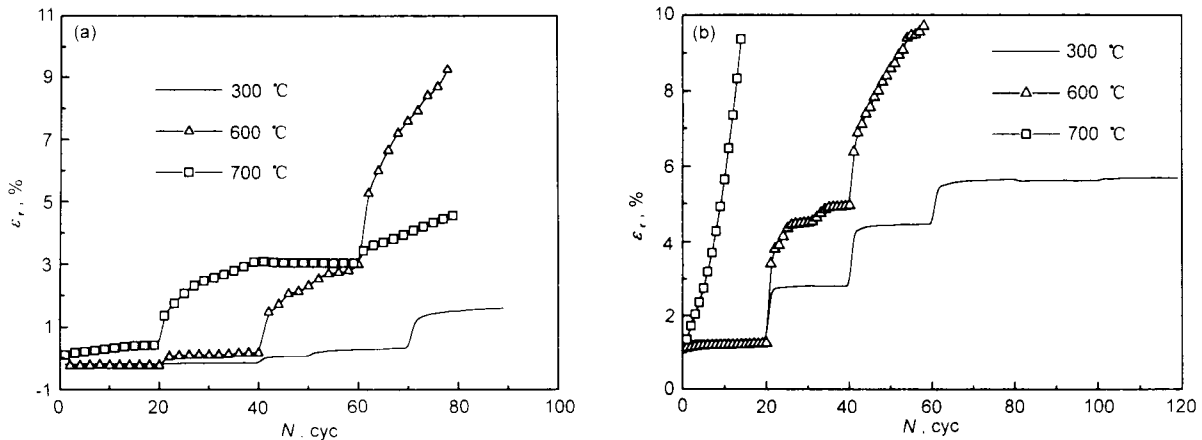


图 5 有无先前应变循环下三种温度的 $\epsilon_r - N$ 关系曲线

Fig.5 Diagram of ϵ_r vs N under three kinds of temperature values
(a) with prior strain cycling (b) without prior strain cycling

应力循环时,产生了明显的棘轮应变, $d\epsilon_r/dN$ 均较大. 通过研究发现,在无先前应变循环时,在 $(26\pm 127)\text{MPa}$ 应力循环下的 $d\epsilon_r/dN$ 很大,且随 N 增大而逐渐增大,循环到 15 cyc 左右时,试样已产生了 10% 的轴向拉伸棘轮应变. 由此可以看出,先前应变循环导致了材料明显的循环硬化,从而抑制了后继应力循环时的棘轮应变产生.

综合上述三种温度情形可以看出, 304 不锈钢的高温单轴非对称应力循环下的棘轮行为具有明显的应变循环历史依赖性.

4 结论

(1) 304 不锈钢在从室温到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的应变循环硬化 - 软化行为明显依赖于应变幅值及其历史; 而 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 这种应变幅值历史依赖性不明显.

(2) 304 不锈钢的应变循环行为具有明显的先前最高温度下循环历史的衰减记忆特征.

(3) 应力控制循环中, 当应力幅值恒定时, 在多种温度下, 平均应力越大, 棘轮应变越大, 且棘轮应变率有明显的平均应力历史依赖性.

(4) 应力控制循环中, 当平均应力恒定时, 应力幅值越

大, 棘轮应变率也越大; 当应力幅值从大变小时, 其棘轮应变率明显变小, 甚至为零. 这表明棘轮应变率依赖于应力幅值历史.

(5) 在有先前应变循环之后, 材料的应变循环硬化将会对后继应力循环下的棘轮行为产生抑制作用, 导致材料的棘轮应变率较无先前应变循环时明显变小.

参考文献

- [1] Yoshida F, Ohta I K, Shiratori E. *Bull JSME*, 1980; 24: 507
- [2] Yoshida F, Kondo J, Kikuchi Y. *Trans Jpn Soc Mech Eng*, 1988; 54A: 1151
(吉田念仁, 近藤 丈, 菊池义和. 日本机械学会论文集(A篇), 1988; 54: 1151)
- [3] Hassan T, Kyriakides S. *Int J Plast*, 1992; 8: 91
- [4] Hassan T, Kyriakides S. *Int J Plast*, 1994; 10: 149
- [5] Ruggles M D, Krempl E. *ASME J Eng Technol*, 1989; 111: 378
- [6] Yang X J, Gao Q, Cai L X. *J Southwest Jiaotong Univ*, 1997; 32: 604
(杨显杰, 高 庆, 蔡力勋. 西南交通大学学报, 1997; 32: 604)
- [7] Yang X J, Gao Q, Cai L X. *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 1997; 18: 395
(杨显杰, 高 庆, 蔡力勋. 航空学报, 1997; 18: 395)