

# 321 不锈钢低周疲劳过程中的动态应变时效

余 萌<sup>1</sup>, 张怀征<sup>2</sup>, 何国球<sup>1</sup>, 张 凡<sup>2</sup>

(1. 同济大学 上海市金属功能材料重点实验室, 上海 201804; 2. 西门子中国研究院 燃气轮机设计工程中心, 上海 200240)

**摘要:** 研究 321 不锈钢高温低周疲劳过程中的动态应变时效行为, 并分析不同温度下疲劳迟滞回线以及峰值应力曲线。结果表明: 动态应变时效锯齿屈服行为仅发生在 550℃ 以上; 在高温疲劳试验中锯齿屈服大多发生在疲劳前 10 周, 10 周之后锯齿屈服现象减弱或者消失; 应变幅值越小, 锯齿幅度越小, 消失越快。

**关键词:** 321 不锈钢; 动态应变时效; 锯齿屈服; 低周疲劳  
**中图分类号:** TG142.25 **文献标志码:** A

## Dynamic Strain Aging in 321 Stainless Steel During Low Cycle Fatigue Test

SHE Meng<sup>1</sup>, ZHANG Huai Zheng<sup>2</sup>, HE Guo Qiu<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Metal Functional Materials, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Gas Turbine Design Engineering Center, Siemens China Research Institute, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** This work studied the DSA behavior during high temperature LCF testing of 321 stainless steel. Through analyzing the hysteresis loops and peak stress curves at different temperatures, the results showed that most of serrated yielding behavior appeared at the first 10 cycles of LCF and then weakened. In addition, strain amplitude also had an effect on serrated yielding amplitude. The lower the strain amplitude was, the lower the serrated yielding amplitude became, and the faster the serrated yielding behavior vanished.

**Key words:** 321 stainless steel; dynamic strain aging; serrated yielding; low cycle fatigue

屈服行为现象和机理, 认为锯齿屈服行为是材料变形过程中反复发生的应力随应变增加而波动的现象, 其机理为合金中的溶质原子和移动的位错之间在塑性形变过程中的交互作用。

321 不锈钢在工业和能源领域是使用量较大的材料之一, 并且多用在高温载荷环境下。国内的研究多集中于 316 不锈钢的锯齿行为, 对于 321 不锈钢的研究主要集中在拉伸过程中锯齿屈服行为研究, 对于疲劳过程中的锯齿行为研究甚少, 并且关于锯齿屈服行为在低周疲劳中的发生条件、发生时间、随着循环周次的演化以及不同应变量对其影响等问题仍缺乏深入调查。本文针对 321 不锈钢在常温、550℃ 和 650℃ 进行了不同应变幅的系列试验, 通过分析疲劳迟滞回线研究 321 不锈钢中锯齿行为在应变控制低周疲劳中的规律。

## 1 试验方法

试验用材料 321 不锈钢板材厚度为 20 mm, 化学成分见表 1。试验材料为固溶处理态, 试验样品均为纵向取样。样品工作段直径为 10 mm。

表 1 321 不锈钢化学成分

Tab.1 Chemical compositions of 321 stainless steel

%			
元素	质量分数	元素	质量分数
C	0.021	S	0.001
Si	0.54	Cr	17.37
Mn	1.55	Ni	8.93
P	0.023	Ti	0.24

所有低周疲劳测试均在液压伺服轴向拉压万能试验机 MTS 810 上进行。加热方式采用三段式电热丝加热炉进行加热, 试验温度为常温、550℃ 和 650℃。试验环境为大气实验室静态空气介质, 采用轴向应变控制的拉压载荷方式, 三角波形, 形变速率为  $0.1\% \cdot s^{-1}$  (相对于试样标距), 各个试验均进行

锯齿屈服行为经常发生在合金钢、不锈钢和高温合金材料的高温拉伸和疲劳试验中, 其中不锈钢的锯齿屈服近年来受到较大关注, 并且已经有了较深入的研究<sup>[1-10]</sup>。韩鹏程等<sup>[9]</sup>讨论了拉伸过程中锯齿

到试样断裂为止.

## 2 结果和讨论

对 321 不锈钢在常温、550℃ 和 650℃, 应变幅为  $\pm 0.9\%$ ,  $\pm 0.7\%$ ,  $\pm 0.5\%$  进行了低周疲劳测试. 在常温和 550℃ 时, 三个应变幅下低周疲劳试验均没有锯齿屈服现象发生, 650℃ 时三个应变幅下低周疲劳试验均有锯齿屈服现象发生. 这是由于 650℃ 处于 321 不锈钢动态应变时效敏感温区内, 移动的溶质原子 Cr 和 Mn 阻碍了位错的运动, 使位错在疲劳变形过程中反复被钉扎, 表现为迟滞回线上的锯齿波. 图 1 为应变控制低周疲劳试验第 1 周的迟滞回线, 应变幅为  $\pm 0.7\%$ , 测试温度分别为常温、550℃ 和 650℃. 结果表明, 常温和 550℃ 低周疲劳在  $\pm 0.7\%$  应变幅下没有锯齿屈服行为出现, 650℃ 低周疲劳中出现了明显的锯齿屈服. 因为温度会影响溶质原子的扩散, 温度越低, 溶质原子扩散越慢, 需要的应变越大; 温度越高, 溶质原子扩散速度越快, 需要的应变越小. 本文结果与 Nikulin 等<sup>[5]</sup> 和韩鹏程等<sup>[9]</sup> 的研究一致. Nikulin 等<sup>[5]</sup> 研究表明, 对于 347 不锈钢, 单向拉伸试验过程中低于 520℃ 时没有锯齿屈服发生. 韩鹏程等<sup>[9]</sup> 的研究表明, 316L 不锈钢在单向拉伸试验过程中, 发生锯齿屈服的临界应变量随温度升高而下降, 在临界应变量以下没有锯齿屈服现象发生; 在 550℃ 时临界应变量为 2%, 在 600℃ 以上时临界应变量小于 1%. 由此推断, 本文中的低周疲劳应变量为 0.9%, 0.7% 和 0.5%, 在 550℃ 时不足以触发锯齿屈服行为. 然而当温度达到 650℃, 随着临界应变量的减小, 疲劳试验的应变量超过了临界应变量, 因此疲劳迟滞回线中出现锯齿屈服现象.

在 650℃ 时, 三个应变幅前 20 周的低周疲劳峰值应力见图 2. 可以看出, 在 650℃ 时 321 不锈钢的低周疲劳首先发生循环硬化, 峰值应力随循环周次的增加不断增加, 在第 10 周达到应力饱和, 10 周之后峰值应力基本不再变化.

从图 3~7 可以看出, 650℃ 时三个应变幅迟滞回线中材料的弹性行为基本一致. 第 1 周内三个应变幅的迟滞回线均有锯齿屈服存在,  $\pm 0.9\%$  和  $\pm 0.7\%$  的锯齿幅度大于  $\pm 0.5\%$  的锯齿幅度. 因为足够大的应变产生了大量的空穴, 促进了溶质原子的移动, 使得移动的溶质原子与位错的交互作用增强, 应变幅  $\pm 0.9\%$  和  $\pm 0.7\%$  的锯齿幅度大约为 25 MPa 以上, 应变幅  $\pm 0.5\%$  的锯齿幅度小于 10 MPa.

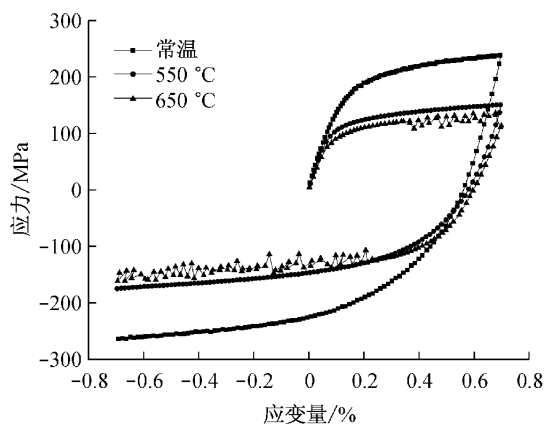


图 1 应变幅为  $\pm 0.7\%$  时低周疲劳试验第 1 周迟滞回线  
Fig.1 First cycle hysteresis loop of low cycle fatigue test at strain amplitude of  $\pm 0.7\%$

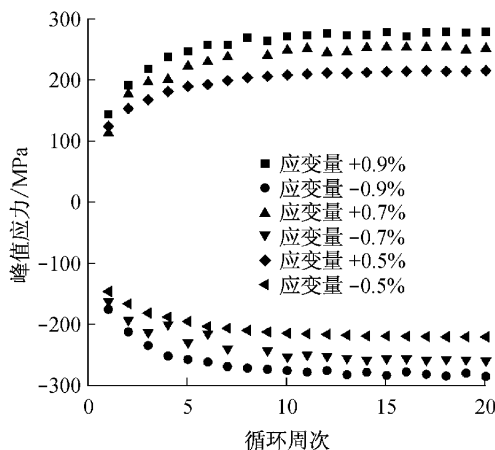


图 2 650℃ 时三个应变幅前 20 周峰值应力  
Fig.2 The first 20 cycles peak stress of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

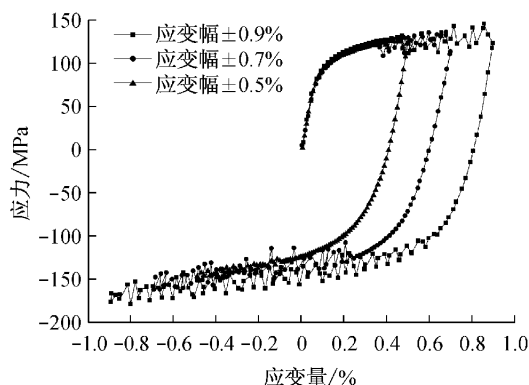


图 3 650℃ 时三个应变幅第 1 周迟滞回线  
Fig.3 Hysteresis loop of the first cycle of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

动态应变时效为溶质原子和移动的位错之间在塑性形变过程中的交互作用, 因此动态应变时效主

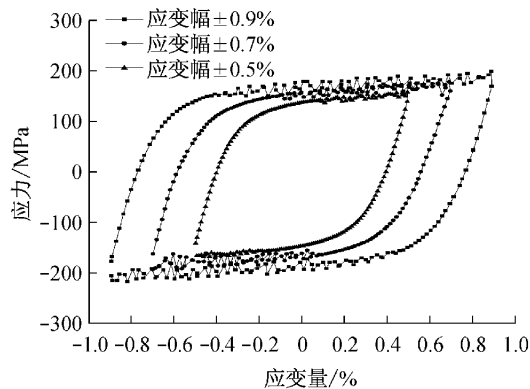


图4 650℃时三个应变幅第2周迟滞回线

Fig.4 Hysteresis loop of the second cycle under of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

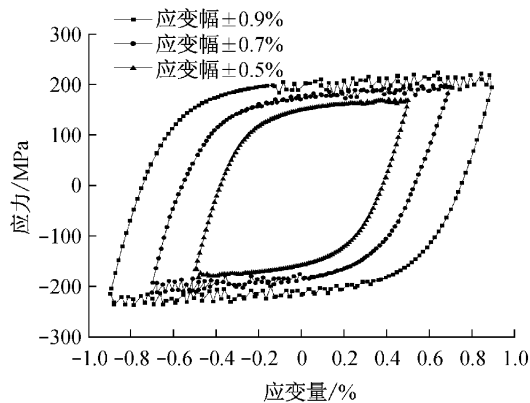


图5 650℃时三个应变幅第3周迟滞回线

Fig.5 Hysteresis loop of the third cycle of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

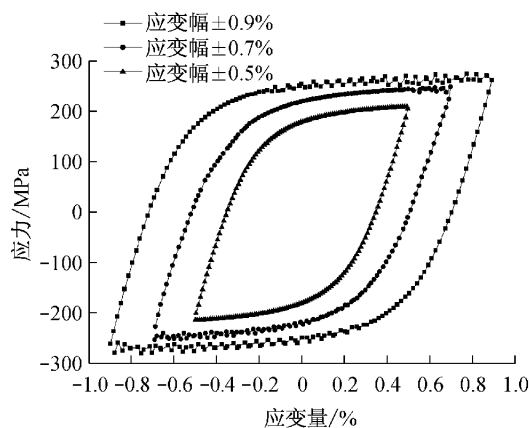


图6 650℃时三个应变幅第10周迟滞回线

Fig.6 Hysteresis loop of the tenth cycle of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

要发生在塑性形变阶段,与塑形应变变量有关.前3周动态应变时效发生的塑性应变变量见表2.结果表明,随着疲劳试验应变幅的减小,塑形应变变量变小,锯齿屈服程度变小.

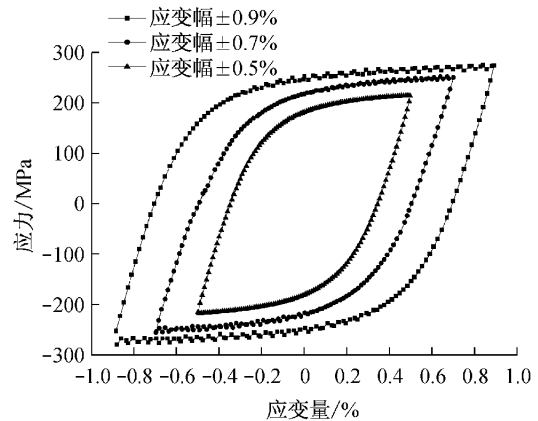


图7 650℃时三个应变幅第100周迟滞回线

Fig.7 Hysteresis loop of the 100th cycle of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

表2 650℃时三个应变幅前3周动态应变时效发生的塑性应变变量

Tab.2 Value of plastic deformation of low cycle fatigue test under 650℃, at three strain amplitudes %

周次	应变幅±0.9%		应变幅±0.7%		应变幅±0.5%	
	拉	压	拉	压	拉	压
1	0.50	1.50	0.40	0.90	0.20	0.50
2	1.30	1.30	0.80	0.80	0.40	0.30
3	1.00	1.20	0.70	0.70	0.10	0.05

从第1周到第10周动态应变时效的锯齿幅度逐渐减弱或者消失.应变幅±0.5%的锯齿屈服在第3周后基本消失,应变幅±0.7%的锯齿屈服在第10周后基本消失,应变幅±0.9%的锯齿屈服到第100周依然存在,但锯齿幅度已经明显减弱.因为小应变幅疲劳试验循环周次初期,韧性位错被溶质原子钉扎,溶质原子与位错的交互作用逐渐变弱至消失,大应变幅疲劳试验产生大量的位错与空穴,促进溶质原子与位错的交互作用,但是随着循环周次增加,裂纹大量萌生及迅速扩展,动态应变时效作用减弱至消失.

从图8可以看出,由循环周次增加引起锯齿应变的临界应力逐渐增加,但在第6周后临界应力不再增加.其原因在于循环应变条件下材料不断发生加工硬化,材料的屈服应力不断增加,动态应变时效仅发生在塑性应变阶段,因此弹性应力的增加导致锯齿应变的临界应力增加.

### 3 结论

(1) 常温和550℃时,321 不锈钢在三个应变幅下的疲劳迟滞回线均未出现锯齿屈服现象,而650℃时都出现了锯齿屈服现象.这是因为650℃处于321

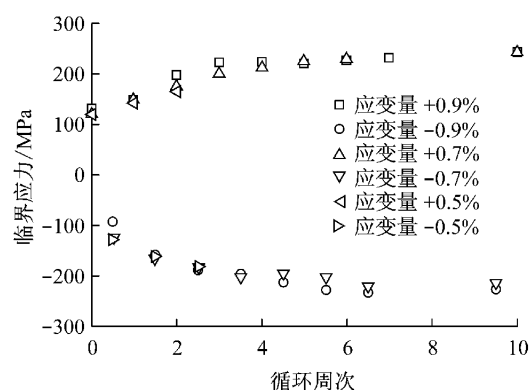


图8 650℃时三个应变幅下锯齿应变的临界应力

Fig.8 Critical stress of serrated strain of three strain amplitudes at the temperature of 650℃

不锈钢动态应变时效敏感温区内,移动的溶质原子Cr和Mn阻碍了位错的运动,使位错在疲劳变形过程中反复被钉扎,表现为迟滞回线上的锯齿波。

(2) 650℃时,321 不锈钢在三个应变幅下的锯齿屈服行为均随着循环周次的增加而减弱。因为随着循环周次增加,裂纹大量萌生及迅速扩展,溶质原子与位错的交互作用减弱至消失,同时锯齿屈服行为也减弱至消失。

(3) 650℃时,引起动态应变时效的临界应力随着循环周次的增加而增加。因为动态应变时效仅发生在塑性应变阶段,随循环周次增加,材料不断发生加工硬化,触发塑性形变的应力逐渐增大。

(4) 650℃时,随疲劳试验应变幅减小,塑性应变变形变量减小,锯齿屈服程度变小。

#### 参考文献:

[1] Almeida L H, Emygdio P R O, Lemay I. Activation energy calculation and dynamic strain aging in austenitic stainless steel [J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1994, 31(5): 505.  
[2] Samuel K G, Mannan S L, Rodriguez P. Serrated yielding in

AISI 316 stainless steel [J]. *Acta Metallurgica*, 1988, 36 (8): 2323.

- [3] Gironès A, Llanes L, Anglada M, *et al.* Dynamic strain ageing effects on superduplex stainless steels at intermediate temperatures [J]. *Material Science and Engineering A*, 2004, 367(1/2): 322.  
[4] Choudhary B K, Bhanu Sankara Rao K, Mannan S L, *et al.* Serrated yielding in 9Cr-1Mo ferritic steel [J]. *Materials Science and Technology*, 1999, 15(7): 791.  
[5] Nikulin I, Kaibyshev R. Deformation behavior and the Portevin-Le Chatelier effect in a modified 18Cr-8Ni stainless steel [J]. *Material Science and Engineering A*, 2011, 528(3): 1340.  
[6] 钱匡武,倪潮方. 1Cr18Ni9Ti 钢中的锯齿屈服现象 [J]. *福州大学学报*, 1988, 16(3): 108.  
QIAN Kuangwu, NI Chaofang. Serrated yielding phenomenon in austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti [J]. *Journal of Fuzhou University*, 1988, 16(3): 108.  
[7] 彭开萍,陈文者,钱匡武. 18-8 型奥氏体不锈钢动态应变时效后的微观组织 [J]. *材料热处理学报*, 2005, 26(5): 109.  
PENG Kaiping, CHEN Wenzhe, QIAN Kuangwu. Microstructure of 18-8 type austenitic stainless steel after dynamic stain aging treatment [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2005, 26(5): 109.  
[8] 孙延安,李春福,鲁亮,等. 动态应变时效对 35CrMo 钢力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2011, 40(22): 169.  
SUN Yanan, LI Chunfu, LU Liang, *et al.* Effect of dynamic stain aging on mechanical properties of 35CrMo steel [J]. *Material & Heat Treatment*, 2011, 40(22): 169.  
[9] 韩鹏程,田荣,沈寅忠,等. 316L 奥氏体不锈钢高温拉伸时的动态应变时效 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41(16): 1.  
HAN Pengcheng, TIAN Rong, SHEN Yanzhong, *et al.* Dynamic stain aging in 316L austenitic stainless steel during tensile test at high temperature [J]. *Material & Heat Treatment*, 2012, 41(16): 1.  
[10] 江慧丰,陈学东,范治超,等. 动态应变时效对 316L 不锈钢疲劳蠕变行为的影响 [J]. *金属学报*, 2009, 45(3): 326.  
JIANG Huifeng, CHEN Xuedong, FAN Zhichao, *et al.* Effect of dynamic stain aging on fatigue-creep behavior of 316L austenitic stainless steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(3): 326.