

316L 不锈钢的高温疲劳蠕变行为和寿命预测 *

董 杰^{1,2} 陈学东¹ 范志超¹ 江慧丰^{1,2} 姜 恒¹ 陆守香²

1. 合肥通用机械研究院国家压力容器与管道安全工程技术研究中心 合肥 230031
2. 中国科学技术大学安全科学与工程系 合肥 230027

摘 要 进行 316L 不锈钢在单级和两级载荷作用下的高温疲劳蠕变试验,研究了载荷历程效应对材料行为的影响.在已有统一的疲劳蠕变损伤演化模型基础上,得到了 316L 高温单级载荷作用下非线性损伤演化曲线.同时,建立了一种耦合载荷历程效应的多级疲劳蠕变载荷作用下的材料破坏准则.基于该破坏准则,结合材料的非线性损伤模型对 316L 不锈钢高温两级载荷作用下的疲劳蠕变寿命进行了预测,预测结果与试验数据符合得比较好.

关键词 材料科学基础科学,寿命预测,破坏准则,疲劳蠕变,载荷历程

分类号 TG113

文章编号 1005-3093(2009)05-0541-05

High temperature fatigue creep behavior and life prediction of 316L stainless steel under 2-step load

DONG Jie^{1,2**} CHEN Xuedong¹ FAN Zhichao¹ JIANG Huifeng^{1,2}
JIANG Heng¹ LU Shouxiang²

1. National Technology Research Center on Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering of Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031

2. Department of Safety Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027

* Supported by the National Great Project of Scientific and Technical Supporting Programs of China during the 11th Five-year Plan No.2006BAK02B02-02 and Natural Science Foundation of Anhui Province No.070415223.

Manuscript received November 28, 2008; in revised form April 22, 2009.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0551)5335485, E-mail:rockdj1980@sohu.com

ABSTRACT High temperature fatigue creep test of 316L stainless steel under 1-step and 2-step load was conducted, the influence of the load history on material behavior was investigated emphatically. On the basis of the uniform fatigue creep damage evolution model, the nonlinear damage evolution curves of 316L steel under 1-step load at high temperature were obtained. A modified failure rule coupled with the load history effect under multi-step load was proposed. High temperature 316L steel fatigue creep life under 2-step load was predicted by the failure rule and the nonlinear damage model. The predicted results were in good agreement with the experimental ones.

KEY WORDS foundational discipline in materials science, life prediction, failure rule, fatigue creep, load history

疲劳蠕变交互作用是高温承压设备的常见失效模式之一.由于这种失效模式的重大危害性及普遍性,现已开展了较多的针对单级恒定幅值疲劳蠕变载荷作用下的材料行为^[1-3]和寿命预测方法^[4-6]研究.但是在实际生产中,材料或设备所承受载荷的幅值很难维持恒定,不同幅值的载荷先后加载导致载荷

历程效应^[7],影响材料的循环行为和寿命.当前,针对载荷历程例如短时超载^[8,9]、多级加载^[10]等影响材料疲劳行为和寿命的问题已开展了一些研究.但是,关于材料在疲劳蠕变交互作用下的载荷历程效应的研究还比较少.为此,本文进行高温环境下 316L 不锈钢单级以及两级载荷作用的蠕变疲劳试验,研究载荷历程对材料行为的影响,并结合材料非线性损伤演化模型预测高温两级加载下材料的疲劳蠕变寿命.

1 实验方法

为了解 316L 不锈钢在不同幅值疲劳蠕变载荷作

* “十一五”国家科技支撑计划专题 2006BAK02B02-02 和安徽省自然科学基金 070415223 资助项目.
2008 年 11 月 28 日收到初稿;2009 年 4 月 22 日收到修改稿.
本文联系人:董 杰

用下的损伤演化过程,进行单级恒定幅值应力和温度载荷作用下材料的疲劳蠕变试验.材料的化学成分列于表1.试验在液压伺服试验机 MTS809 上进行,试样为圆棒形,标距 35 mm,直径 10 mm(图1).试验采用应力控制,载荷波形为梯形,一个周期 12 s,包括在最大和最小应力时各 5 s 的保载时间段以及各 1 s

的加卸载时间段.具体试验参数列于表2.进行两级应力和两级温度的疲劳蠕变试验时,先在第一级载荷作用下施加一定的循环寿命分数,然后载荷改变至第二级,循环直至试样破坏.表3给出了具体的试验数据.试验的最大应力均为 385 MPa,下文中的表或图中的应力均指最小应力.

表1 316L 不锈钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel (mass fraction,%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
0.025	0.383	1.22	0.02	0.012	12.54	18.09	2.34	0.011	Balance

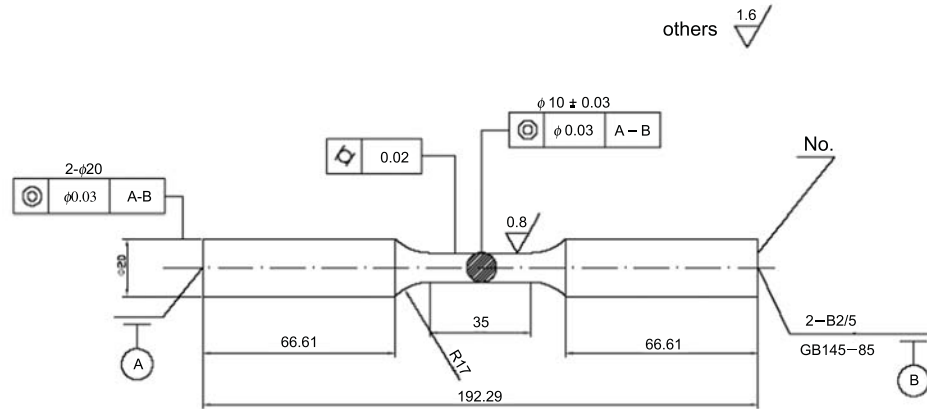


图1 疲劳蠕变试样

Fig.1 Fatigue creep test specimen

表2 单级载荷疲劳蠕变试验

Table 2 Fatigue creep test under 1-step load

Temperature/°C	Maximum stress/MPa	Minimum stress/MPa	Life/cycles
550	385	-50	2808
550	385	-150	690
540	385	-100	3821
560	385	-100	567

表3 两级疲劳蠕变载荷试验

Table 3 Fatigue creep test under 2-step load

1 st step load parameter				2 nd step load parameter			
Temperature /°C	Stress /MPa	Life fraction	Life /cycles	Temperature /°C	Stress /MPa	Tested life fraction	Tested life /cycles
550	-150	0.7	483	550	-50	0.222	624
		0.5	345			0.377	1058
		0.3	207			0.486	1366
	-50	0.7	1966		-150	0.138	95
		0.5	1404			0.386	266
		0.3	842			0.155	107
560	-100	0.7	397	540	-100	0.216	827
		0.5	284			0.522	1993
		0.3	170			0.617	2357
540		0.7	2675	560		0.277	157
		0.5	1911			0.307	174
		0.3	1146			0.584	331

2 载荷历程对材料循环行为的影响

图 2 和图 3 给出了单级和两级疲劳蠕变加载下应变幅的比较, 四条曲线中的一条是单级加载下的应变幅, 另外三条是不同寿命分数 (0.3, 0.5, 0.7) 的第一级载荷作用后第二级载荷作用下的应变幅. 所有两级试验的最大应力均固定为 385 MPa. 图 2 中的两级载荷最小应力从 -150 MPa 转变成 -50 MPa, 其应力幅从高转变成低, 因此这种加载方式可认为是高低加载. 图 3 中的最小应力从 -50 MPa 转变成 -150 MPa, 加载方式可认为是低高加载. 可以看出, 对于高低加载, 第一级载荷寿命分数为 0.7 时, 第二级载荷作用下的应变幅大于单级加载情况, 而寿命分数为 0.5 或 0.3 时, 均小于单级加载情况; 对于低高加载, 不论第一级载荷的寿命分数是多少, 第二级载荷作用下的应变幅均小于单级加载情况. 以上行为表明, 材料在不同幅值、不同寿命分数的第一级载荷作用后产生了不同程度的循环硬化或软化. 在一般情况下, 材料在循环过程中可能发生循环硬化, 也可能发生循环软化, 与材料本身以及循环周次等因素有关. 图中的曲线还表明, 在不同幅值载荷作用下, 即使循环相同的寿命分数, 材料的硬化或软化状态也不相同.

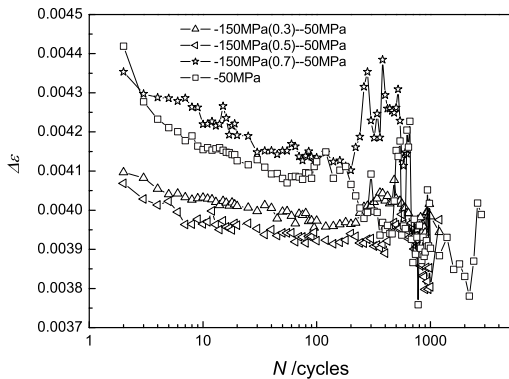


图 2 高低加载方式第二级载荷作用下应变幅

Fig.2 Strain range under the second step load for the high-low case

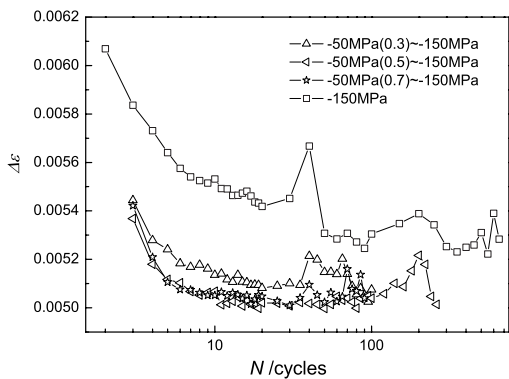


图 3 低高加载方式第二级载荷作用下应变幅

Fig.3 Strain range under the second step load for the low-high case

图 4、图 5 分别给出了最小应力从 -150 MPa 转变成 -50 MPa 以及从 -50 MPa 转变成 -150 MPa 两级加载的循环迟滞曲线. 图 4 是高低加载, 图 5 是低高加载. 两图给出的第一级载荷的寿命分数均为 0.5, 图中的箭头“Load change”指出载荷转变的时刻. 从图 5 的低高加载迟滞中可见, 在载荷转变时刻应变突然增大, 有一个明显的跳变如箭头表示“Strain Step”, 而图 4 的高低加载则没有. 对于两级温度加载, 当载荷转变时也是低温到高温的低高加载方式存在应变跳变, 而由高温转变成低温的高低加载方式没有出现应变跳变. 在载荷转变时两级疲劳蠕变加载出现上述应变跳变现象, 首先应与材料本身的力学性能有关. 对于两级应力加载, 载荷转变时反向压缩载荷增大将会改变材料的随动硬化程度, 从而导致在后继相同的正向拉伸载荷作用下产生较大的应变, 发生应变跳变. 对于两级温度加载, 则是由于不同温度材料力学性能的软化程度不同导致应变跳变现象. 除此之外, 根据已有的研究结果, 由于试验载荷条件正处于 316L 高温 DSA 作用区^[11], 应变跳变也可能与

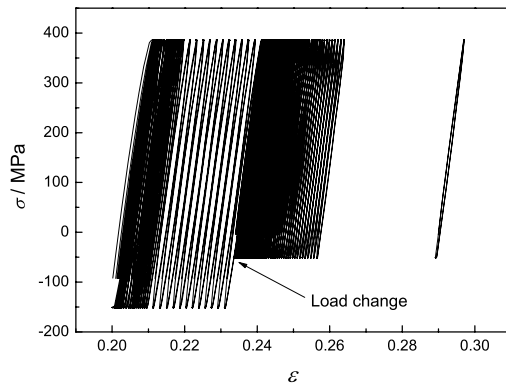


图 4 最小应力从 -150 MPa 转变成 -50 MPa 的两级加载迟滞曲线

Fig.4 Stress-strain curve for load changed from -150 MPa to -50 MPa

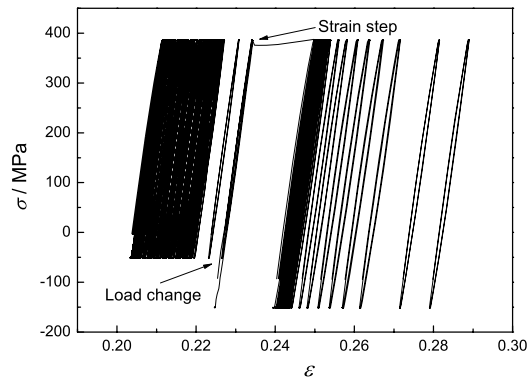


图 5 最小应力从 -50 MPa 转变成 -150 MPa 的两级加载迟滞曲线

Fig.5 Stress-strain curve for load changed from -50 MPa to -150 MPa

DSA 现象有关^[12]. DSA 是材料在塑性变形时溶质原子与可动位错发生交互作用引起的, 而能否出现 DSA 现象则取决于材料的变形速率和环境温度^[13,14]. 对于低高加载, 在第一级载荷作用后形成了位错和溶质原子相互作用比较稳定的微观结构, 当载荷转变成高幅后这种稳定的结构被破坏, 位错脱离溶质原子束缚导致瞬时位错平均自由程增大, 位错重新排列后材料变软而产生应变跳变. 而对于高低加载, 后一级的低载无法破坏前一高载下形成的稳定结构, 因此没有出现应变跳变. 高低或低高的不同加载方式决定了载荷转变时是否出现应变跳变, 这也是一种载荷历程效应.

3 316L 疲劳蠕变交互作用损伤的演化方程

对于疲劳蠕变交互作用下材料损伤演化研究多采用分别处理疲劳损伤和蠕变损伤的方式^[15], 这意味着需要进行单独的疲劳蠕变试验以拟合损伤演化方程中的参数. 陈等^[16]基于连续损伤力学提出了一个统一的疲劳蠕变交互作用下损伤演化方程

$$D = 1 - (1 - D_0)(1 - N/N_f)^k \quad (1)$$

其中 D 为损伤参数, D_0 为初始损伤, N 为循环周次, N_f 为循环寿命, k 为由载荷决定的损伤指数. 为了确定 k , 需定义另一个参数

$$D = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\max 1}) / (\varepsilon_f - \varepsilon_{\max 1}) \quad (2)$$

以表征当前的损伤, 其中 ε_{\max} 为每一循环周次的最大应变, $\varepsilon_{\max 1}$ 为第一循环周次的最大应变, ε_f 为断裂延性. 这样定义能消除第一周循环产生的较大的应变增量对损伤的影响, 从而更清楚地反映循环过程中损伤的发展. 由式 (2) 可知, D_0 为 0 时式 (1) 可简化为

$$D = 1 - (1 - N/N_f)^k \quad (3)$$

根据上式拟合由式 (2) 给出的损伤数据, 可得到参数 k . 图 6 给出了不同幅值单级疲劳蠕变载荷作用下损伤演化曲线, 表 4 给出了拟合得到的损伤指数. 从表 4 可以看出, 应力和温度的幅值越大, k 也越大.

4 两级疲劳蠕变载荷作用下的寿命预测

多级载荷作用下的破坏准则一般可写为

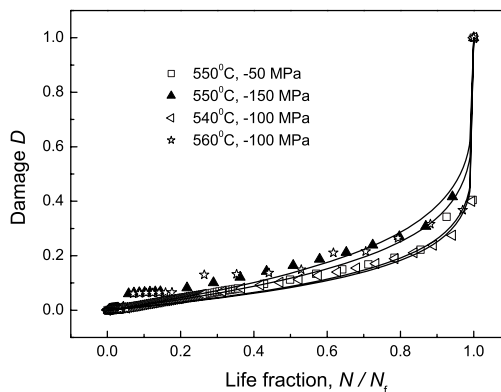


图 6 316L 钢损伤演化曲线

Fig.6 Damage evolution curves for 316L steel

$$\sum_{i=1}^m D_i = D_c \quad (4)$$

其中 D_i 为在第 i 级载荷作用下产生的损伤, D_c 为材料临界损伤. 通过损伤非线性累积的方法, 用该准则可计及每一载荷步内的损伤增量和载荷历程效应. 但是, 此模型忽略了载荷改变时的损伤增量. 由于模型的损伤参量是通过应变定义的, 如果载荷转变时应变产生了跳变, 则需要将这跳变的应变转变成跳变的损伤计入累积的损伤中.

因此, 考虑到多级加载时的载荷历程效应导致的应变跳变, 给出一个修正的破坏准则

$$\sum_{i=1}^m D_i + \sum_{j=1}^n \Delta D_j = D_c \quad (5)$$

其中 ΔD_j 是第 j 次载荷转变时跳变的损伤增量, 可根据式 (2) 由跳变时的应变增量得到, 于是有

$$\Delta D_j = \Delta \varepsilon_{\max j} / (\varepsilon_f - \varepsilon_{\max 1}) \quad (6)$$

其中 $\Delta \varepsilon_{\max j}$ 为第 j 次载荷转变时应变跳变增量. 由损伤演化方程式 (3) 和修正的破坏准则式 (5) 即可预测材料在多级加载下的疲劳蠕变寿命.

图 7 给出了几种寿命预测方法的比较, 图中横坐标为试验寿命, 纵坐标为预测寿命. Linear damage summation 表示线性叠加法, 是根据每一级载荷寿命分数线性叠加预测的寿命结果, General failure rule 表示由一般破坏准则式 (4) 预测所得结果,

表 4 不同载荷损伤指数

Table 4 Damage exponent for each load case

Load case	550 °C, -50 MPa	550 °C, -150 MPa	540 °C, -100 MPa	560 °C, -100 MPa
k	0.132	0.210	0.126	0.180

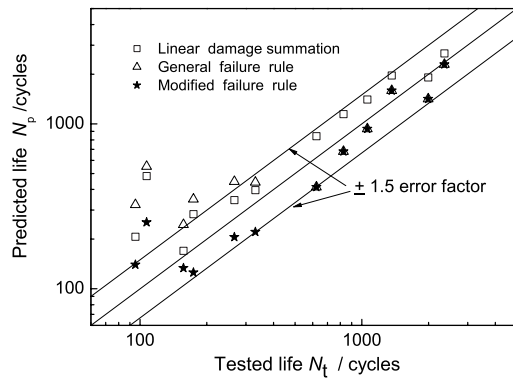


图 7 几种方法的寿命预测结果比较

Fig.7 Comparison of several life predicted methods

Modified failure rule 表示由修正的破坏准则式 (5) 预测的结果. 从图中可看出, 线性叠加法的预测结果只有 75.0% 在 1.5 倍误差范围以内, 一般破坏准则的预测结果只有 58.3% 在 1.5 倍误差范围以内, 而本文提出的修正的破坏准则的预测结果有 91.7% 在 1.5 倍误差范围以内. 由此可见, 本文提出的方法优于线性叠加法和一般破坏准则.

5 结 论

1. 根据 316L 不锈钢的高温环境单级、两级疲劳蠕变载荷作用下的实验结果, 不同寿命分数、不同幅值的第一级载荷作用后会造成材料不同程度的硬化或软化, 从而影响材料在后继载荷作用下的行为. 同时, 由于载荷历程的影响, 低高加载和高低加载两种加载模式在载荷转变时材料的行为有明显不同, 低高加载有应变跳变而高低加载没有.

2. 在统一的疲劳蠕变损伤演化模型基础上得到了 316L 高温单级疲劳蠕变载荷作用下损伤演化曲线. 考虑到载荷历程对材料行为的影响, 在一般破坏准则基础上提出了一种耦合载荷历程效应的修正破坏准则, 能较好地预测 316L 钢高温两级疲劳蠕变载荷作用下的寿命.

参 考 文 献

- 1 CHEN Nianjin, GAO Zengliang, LEI Yuebao, Studies on the law of fatigue and creep for 316L stainless steel at elevated temperature, *Pressure Vessel Technology*, **23**(6),6(2006)
(陈年金, 高增梁, 雷月葆, 316L 钢高温疲劳蠕变规律研究, *压力容器*, **23**(6), 6(2006))
- 2 L.Zrnik, J.Semenak, V.Vrchovinsky, etc, Influence of cycling frequency on cyclic creep characteristics of nickel base single-crystal superalloy, *Material Science and Engineering A*, **319-321**, 637(2001)

- 3 Z.C.Fan, X.D.Chen, L.Chen, etc, Fatigue-creep behavior of 1.25Cr0.5Mo steel at high temperature and its life prediction, *International Journal of Fatigue*, **29**(6), 1174(2007)
- 4 JIANG Jialing, CHEN Ling, FAN Zhichao, Discussion of life prediction for fatigue-creep interaction, *Chinese Journal of Materials Research*, **21**(5), 537(2007)
(蒋家羚, 陈凌, 范志超等, 疲劳-蠕变交互作用的寿命预测探讨, *材料研究学报*, **21**(5), 537(2007))
- 5 T.Goswami, Low cycle fatigue life prediction-a new model, *International Journal of Fatigue*, **19**(2),109(1997)
- 6 YANG Tiecheng, CHEN Ling, FAN Zhichao, Life prediction for fatigue-creep interaction of 1.25Cr0.5Mo steel at elevated temperature, *Pressure Vessel Technology*, **22**(9), 8(2005)
(杨铁成, 陈凌, 范志超, 1.25Cr0.5Mo 钢高温疲劳蠕变交互作用的寿命预测, *压力容器*, **22**(9), 8(2005))
- 7 A.Fatemi, L.Yang, Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials, *International Journal of Fatigue*, **20**(1), 9(1998)
- 8 X.L.Zheng, Overload effects on fatigue behaviour and life prediction of low-carbon steels, *International Journal of Fatigue*, **17**(5), 331(1995)
- 9 R.Kumar, A.Kumar, K.Singh, Effect of rest time after application of single overload cycle on fatigue life, *Engineering Fracture Mechanics*, **54**(1), 147(1996)
- 10 M.Walter, J.Aktaa, M.Lerch, Failure behaviour of EUROFER 97 in the low-cycle fatigue region under multi-step loading, *International Journal of Fatigue*, **30**(3), 568(2008)
- 11 S.G.Hong, S.B.Lee, T.S.Byun, Temperature effect on the low-cycle fatigue behavior of type 316L stainless steel: Cyclic non-stabilization and an invariable fatigue parameter, *Material Science and Engineering A*, **457**(1-2), 139(2007)
- 12 GUO Yangbo, TANG Zhiping, A Dislocation-mechanics-based constitutive model for dynamic strain aging, *Acta Metallurgica Sinica*, **23**(3), 251(2002)
(郭扬波, 唐志平, 一种基于位错机制的动态应变时效模型, *固体力学学报*, **23**(3), 251(2002))
- 13 S.G.Hong, K.O.Lee, S.B.Lee, Dynamic strain aging effect on the fatigue resistance of type 316L stainless steel, *International Journal of Fatigue*, **27**(10-12), 1420(2005)
- 14 S.G.Hong, S.B.Lee, Dynamic strain aging under tensile and LCF loading conditions, and their comparison in cold worked 316L stainless steel, *Journal of Nuclear Materials*, **328**(2-3), 232(2004)
- 15 T.W.Kim, D.H.Kang, J.T.Yeom, Continuum damage mechanics-based creep + fatigue-interacted life prediction of nickel-based superalloy at high temperature, *Scripta Materialia*, **57**(12), 1149(2007)
- 16 CHEN Zhiping, JIANG Jialing, CHEN Ling, Research on fatigue-creep interaction damage of steel 1.25Cr0.5Mo, *Acta Metallurgica Sinica*, **43**(6), 637(2007)
(陈志平, 蒋家羚, 陈凌, 1.25Cr0.5Mo 钢疲劳-蠕变交互作用的损伤研究, *金属学报*, **43**(6), 637(2007))