

文章编号:1000-8055(2012)10-2348-08

FGH97 缺口试样基于黏塑性本构的 弹塑性响应分析

袁善虎, 魏大盛, 王延荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对缺口试样在高温条件下局部区域应力应变难于测量的问题, 基于光滑试样材料力学性能试验, 优化得到 550 °C 粉末高温合金 FGH97 的 Chaboche 黏塑性统一本构方程参数, 并将其应用到 FGH97 缺口试样单调拉伸及循环加载弹塑性有限元分析中. 研究结果表明: ① 缺口局部区域进入塑性后其应力分布与弹性条件明显不同, 随应力增大, 最大应力位置向内移动; ② 在循环载荷条件下, 随着循环数的增加, 缺口平分线上应力/应变范围变化不大, 缺口根部塑性区域出现明显平均应力松弛, 并逐渐趋于稳定, 导致缺口根部循环载荷比不同于外部施加载荷; ③ 缺口根部塑性区域逐渐增大, 但增大的幅度逐渐降低. 该研究可为进一步分析缺口构件疲劳寿命影响因素提供支持.

关 键 词: 粉末高温合金; 黏塑性本构模型; 缺口疲劳; 循环应力应变特征; 弹塑性分析

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Analysis of elastoplastic response in FGH97 notched specimens based on viscoplastic constitutive model

YUAN Shan-hu, WEI Da-sheng, WANG Yan-rong

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the difficulties in measuring local stress and strain, the parameters of Chaboche viscoplastic constitutive equations for powder metallurgy super alloy FGH97 at 550 °C, which were obtained based on the experiments of material mechanical properties, were used in the elastoplastic FEM (finite element method) analysis of notched specimens subjected to tensile and cyclic loading. The results show that: (1) plastic stress/strain state at notch root is obviously different from elastic one. With the increase of stress, location of maximum stress moves inside. (2) Under cyclic loading, with the increase of cyclic number, the stress and strain range along symmetric path at notch root changes little. Mean stress relaxation occurred in the plastic zone at notch root gradually turns to be stable, and it also leads to different cyclic stress ratios compared with the applied load. (3) The plastic zone at notch root gradually increases, but the increasing range gradually decreases. The research result can provide support to further analysis of influencing factors which affect fatigue life of FGH97 notched specimens.

收稿日期: 2012-02-13

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2348_026.html

作者简介: 袁善虎(1984—), 男, 山东聊城人, 博士生, 主要从事航空发动机结构强度振动与可靠性方面的研究.

Key words: powder metallurgy superalloy; viscoplastic constitutive model; notched fatigue; characteristics of cyclic stress-strain; elastoplastic analysis

随着航空技术的发展,航空发动机涡轮盘承受着越来越高的温度和离心力引起的高负荷,另一方面由于轮盘子午面形状急剧变化、局部接触、冷却孔以及内部缺陷等在局部区域产生了明显的应力集中,致使局部进入塑性变形,这进一步加剧了裂纹的萌生和扩展,使轮盘寿命降低。目前,粉末高温合金以其优良的性能,成为航空发动机涡轮盘首选材料^[1-2],因此研究含缺口的粉末高温合金结构在高温循环载荷条件下的力学行为,并分析缺口局部区域的应力/应变及塑性区域的变化,可以为应力梯度条件下的涡轮盘寿命预测奠定良好的基础,本文正是这项工作的前期研究。

由于实际结构件形状复杂,为了研究应力集中区域的应力/应变状态,通常采用简化的模型,其中含缺口的平板试样是最为经常采用的一种简化模型^[3]。含缺口平板试样虽然结构简单,但由于缺口应力集中的存在,使得缺口根部应力/应变变化十分剧烈,具有较大的应力/应变梯度,导致缺口根部区域应力/应变测量较为困难,特别是在高温条件下就更加难以准确测量,这势必给缺口构件寿命预测造成影响。

为较好地研究缺口根部应力/应变场的变化趋势,以便准确分析应力集中对缺口试样疲劳寿命的影响因素,通常采用数值方法对缺口根部区域应力/应变进行数值模拟^[4-5],但是缺口根部应力/应变分布不均匀,特别是进入塑性后,其分布与弹性条件下明显不同,再经过循环载荷的塑性累积,其状况就更为复杂。为准确地分析其在循环加载条件下的应力/应变场,需要一种本构模型能够较好地描述材料在循环载荷条件下的非弹性变形行为,如非线性运动硬化、循环硬化/软化及平均应力松弛等。研究表明,经典弹塑性理论不能很好地描述材料循环硬化/软化以及平均应力松弛等现象^[6],而黏塑性统一本构理论^[7]则可以较为准确地描述该现象,许多研究者^[8-9]采用该理论对航空发动机用高温合金材料进行了本构建模,取得了较好的拟合结果,另有研究者^[10]将其应用到结构失效分析中。

本文在粉末高温合金 FGH97 单调拉伸以及循环加载的力学性能试验基础上,针对试验中材料的力学行为采用 Chaboche 黏塑性统一本构方

程进行建模,并将优化得到的本构方程参数结合 UMAT 子程序应用到单调拉伸以及循环加载条件下的缺口试样有限元计算中,分析了不同缺口形式的板状试样在单调拉伸以及循环加载条件下缺口根部应力/应变场变化,以便为准确分析循环载荷条件下影响粉末高温合金缺口疲劳寿命的因素提供支持。

1 材料力学性能试验与本构参数获取

1.1 材料力学性能试验结果及分析

为研究粉末高温合金材料 FGH97 单调拉伸及循环载荷条件下的变形特征,在 550 ℃ 条件下采用圆棒试样开展了相应试验,试验条件如表 1 所示。

表 1 550 ℃ 时 FGH97 材料力学性能试验
Table 1 Experiments of mechanical properties of FGH97 at 550 ℃

试验	应变率	应变比	最大应变/%
单调拉伸试验	10 ⁻³		
对称循环加载试验	10 ⁻³	-1	0.8
非对称循环加载试验	10 ⁻³	0.5	2.4

试验结果如图 1~图 3 所示,可以看出:550 ℃ 条件下,粉末高温合金 FGH97 屈服应力在 900~1 000 MPa 左右,且其塑性较好;在对称循环加载条件下,随着循环数的增加呈现出循环硬化

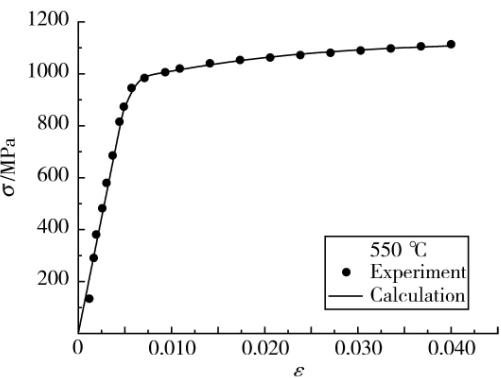


图 1 FGH97 单调拉伸曲线及模拟结果

Fig. 1 Stress-strain curve of FGH97 and simulation result

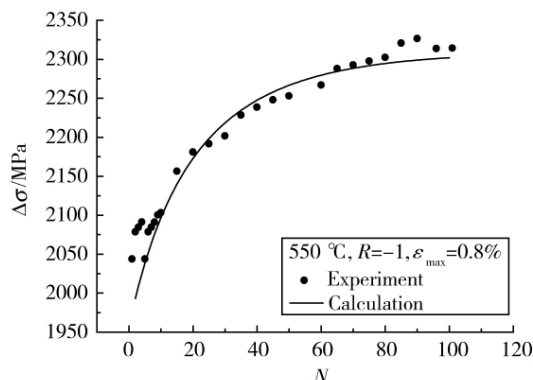


图 2 循环硬化曲线及模拟结果

Fig. 2 Cyclic hardening curve and simulation result

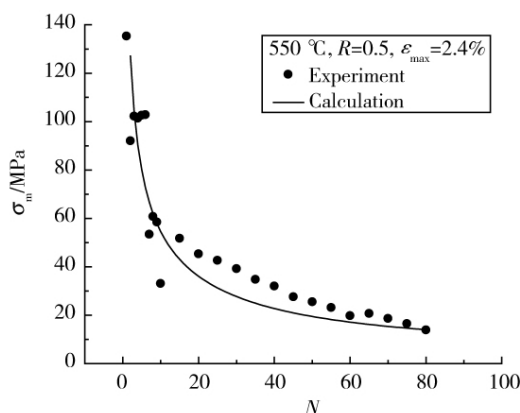


图 3 平均应力松弛曲线及模拟结果

Fig. 3 Mean stress relaxation curve and simulation result

的特征, 大约在 100 个循环左右达到稳定状态; 而在非对称循环加载条件下, 表现出平均应力松弛的特征。

1.2 材料本构建模

根据粉末高温合金 FGH97 在 550 °C 条件下呈现的力学行为, 采用 Chaboche 黏塑性统一本构方程进行建模, 其本构方程为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{\text{in}} = \frac{3}{2} \left[\frac{J(\sigma_{ij} - X_{ij} - R - K)}{K} \right]^n \frac{\sigma'_{ij} - X'_{ij}}{J(\sigma_{ij} - X_{ij})} \quad (1)$$

$$\dot{X}_{ij} = c \left[\frac{3}{2} a \dot{\epsilon}_{ij}^{\text{in}} - \left(\frac{J(X_{ij})}{a} \right)^m \dot{p} X_{ij} \right] \quad (2)$$

$$\dot{R} = b(Q - R) \dot{p} \quad (3)$$

式中 $\dot{\epsilon}_{ij}^{\text{in}}$ 为非弹性应变率; $\dot{p}$ 为累积非弹性应变率; X_{ij} 和 R 分别为材料运动硬化和各向同性硬化的内变量; $J(X)$ 表示自变量 X 的第 2 不变量。另外, 式(1)和式(2)中采用了 2 个内变量 $X_{ij} = X_{ij}^1 + X_{ij}^2$, 因此上述方程中与温度相关的参数为 $K, n, k, a_1, c_1, a_2, c_2, m_1, m_2, b, Q$ 以及弹性模量

E 。鉴于本构方程中, 参数 $K, n, k, a_1, c_1, a_2, c_2$ 与单调拉伸试验曲线相关, 参数 b 和 Q 反映材料循环硬化/软化特征, 参数 m_1, m_2 反映非对称循环条件下材料平均应力松弛特性, 因而采用 Levenberg-Marquardt 优化算法首先对拉伸曲线相关的参数进行拟合, 然后用循环硬化曲线确定 b 和 Q , 再用平均应力松弛曲线确定 m_1, m_2 , 最后再综合进行优化。得到的 Chaboche 本构方程参数如表 2 所示。

表 2 550 °C 时 FGH97 材料的 Chaboche 本构方程参数

Table 2 Parameters of Chaboche equations for FGH97 at 550 °C

参数	数值	参数	数值
E	178029.9	K	556.9
n	22.6	k	451.9
a_1	111.9	a_2	102.5
c_1	1238.2	c_2	58.5
m_1	0.99	m_2	0.92
b	5.3	Q	172.7

为考查优化得到的本构方程参数的准确性, 将表 2 所得参数写入 UMAT 子程序, 并对试验条件下的试样进行了验证计算, 模拟结果如图 1~图 3 所示, 总体来看模拟结果较为理想, 计算与试验结果吻合较好, 可以较好地表征 FGH97 的力学行为, 因而可以将上述本构方程参数应用到缺口试样的数值模拟中。

2 单调拉伸载荷作用下缺口试样数值模拟结果及分析

为分析不同载荷条件下, 不同应力集中程度对缺口根部区域应力/应变的影响, 采用圆形及椭圆形两种缺口形式的单边缺口试样进行计算分析, 缺口形式及试样尺寸如图 4 所示。

为分析随着载荷的增加, 缺口根部从弹性进入塑性时, 应力/应变分布的变化趋势, 两种缺口试样计算时施加净截面应力水平为从 120 MPa 至 840 MPa 间隔取 8 个应力水平, 另一方面对于平板缺口试样, 缺口根部附近缺口平分线上应力/应变对缺口寿命有重要影响^[11-14], 因而在分析中给予了重点关注, 圆形及椭圆形缺口平分线上有限元计算结果如图 5 所示, 图中 x 为距离缺口顶点的距离, r 为缺口半径。可以看出:

1) 两种缺口形式试样, 当缺口根部处于弹性

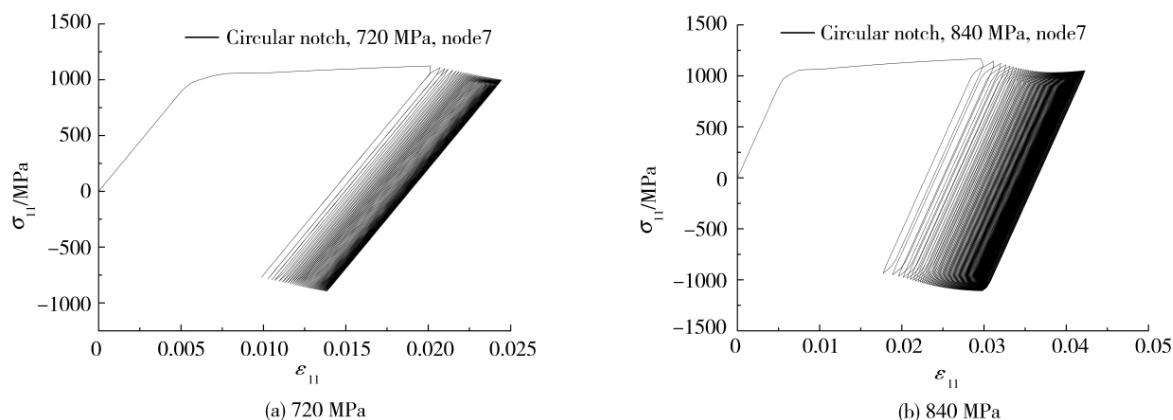


图 6 圆形缺口根部危险点循环应力/应变曲线

Fig. 6 Cyclic stress strain curve at critical point of circular notch root

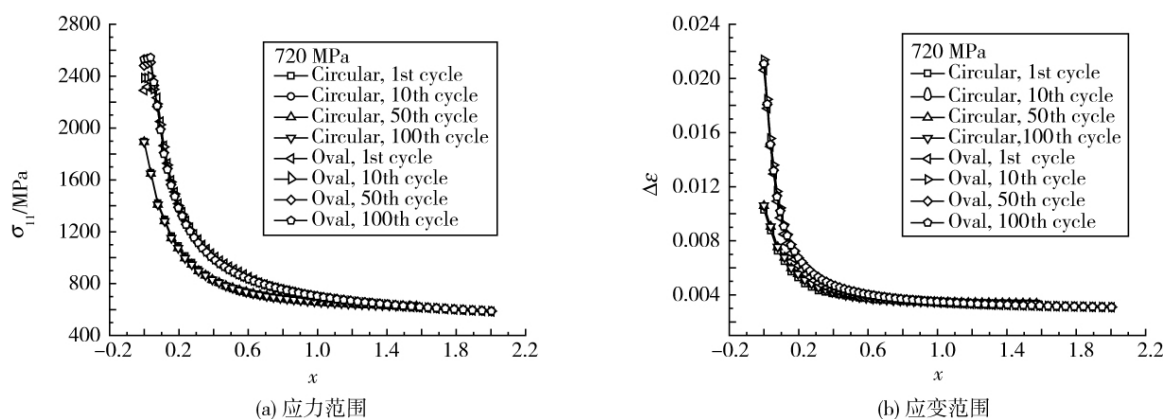


图 7 720 MPa 缺口平分线上应力/应变范围变化

Fig. 7 Stress/strain range along symmetric path at notch root at 720 MPa

位置处。

另外,图 8 和图 9 给出了缺口平分线上不同位置处应力应变曲线及平均应力的变化趋势,可以看出:

1) 对净截面应力 720 MPa 下的两种形式缺口,在第 1 个循环时,缺口根部一定范围内,应力/应变变化存在明显的迟滞回线,即有明显屈服,在此范围之外,则为弹性变形。历经 100 个加载卸载循环后,材料得到强化,迟滞回线基本消失,缺口根部区域基本转变为弹性变化。

2) 沿缺口平分线向内,各位置的变形程度不同,平均应力先增大后减小,然后趋于稳定。

3) 随循环数的增加,在塑性区内平均应力逐渐降低,而在塑性区外,平均应力则逐渐升高,最终缺口平分线上的平均应力趋于稳定状态,导致缺口根部循环应力比与外部施加载荷应力比不同。

4) 由于应力集中系数不同,导致两种形式缺口塑性区变形程度不同,因而圆形缺口与椭圆形

缺口的平均应力变化有所不同,表现在:沿缺口平分线,圆形缺口平均应力较快升至最大值,然后下降,最后趋于平稳;而椭圆形缺口平均应力最初增长缓慢,然后快速上升至最大值,最后趋于平缓。

3.3 缺口根部塑性区随循环载荷的变化

由前文分析可知,在上述循环载荷条件下,缺口根部产生了塑性变形,那么随着循环数的增加,塑性逐渐累积,势必对材料疲劳寿命造成影响。图 10 给出了圆形缺口试样和椭圆形缺口试样在净截面应力为 720 MPa 以及 840 MPa 循环载荷条件下的缺口根部塑性累积,可以看出:

1) 对两种形式缺口而言,随着应力的增大,塑性区范围相应增大;

2) 随循环数的增加,塑性累积增加,塑性区域增大,但增大的幅度逐渐降低;另一方面,在缺口平分线上塑性区增长速度相对较低,而在缺口平分线 $\pm 45^\circ$ 方向,由于最大剪应力出现在该方向上,因而塑性区增长较快。

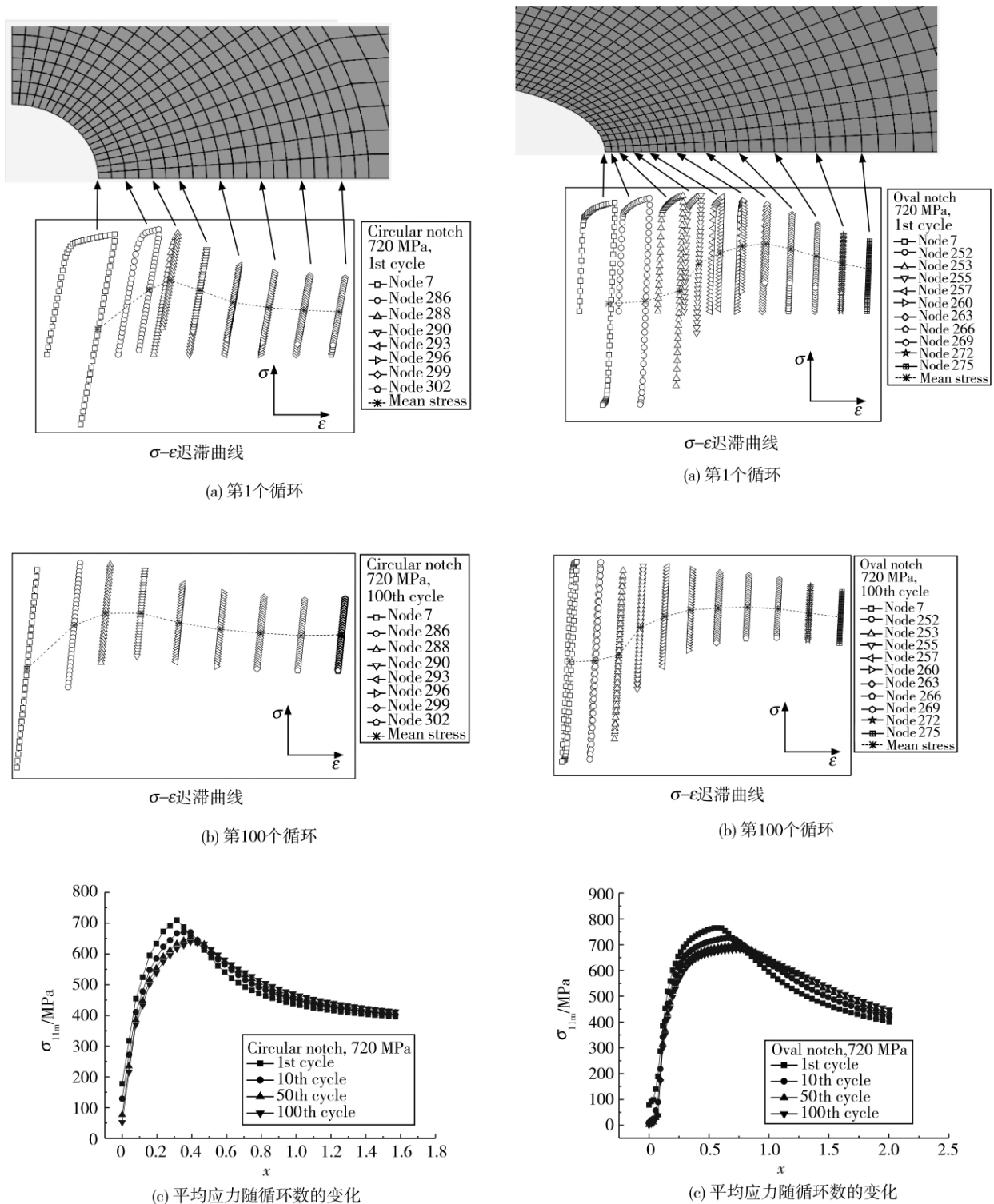


图 8 720 MPa 圆形缺口平分线上不同位置应力/应变曲线及平均应力变化

Fig. 8 Stress-strain curves and mean stress of different locations along symmetric path at circular notch root at 720 MPa

图 9 720 MPa 椭圆形缺口平分线上不同位置应力/应变曲线及平均应力变化

Fig. 9 Stress-strain curves and mean stress of different locations along symmetric path at oval notch root at 720 MPa

基于上述分析可见,除了缺口平分线上最为需要关注的区域,另外 $\pm 45^\circ$ 方向可能也较为危险,

在开展的与计算条件相同的缺口疲劳试验中便观察到了该方向上有可见裂纹出现,如图 11 所示.

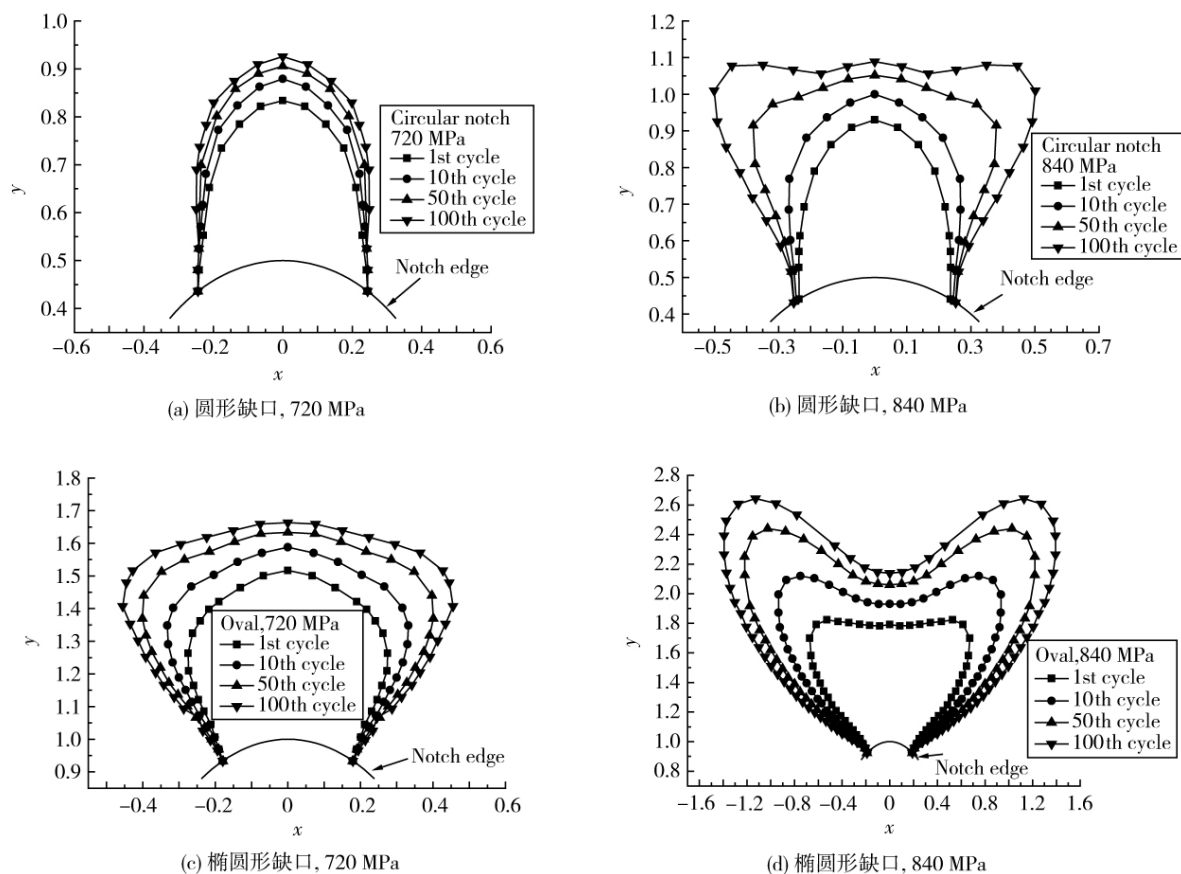


图 10 两种缺口形式不同载荷条件下塑性区随循环数的变化

Fig. 10 Varying behaviors of plastic zone under different conditions of loading for two kinds of notched specimen

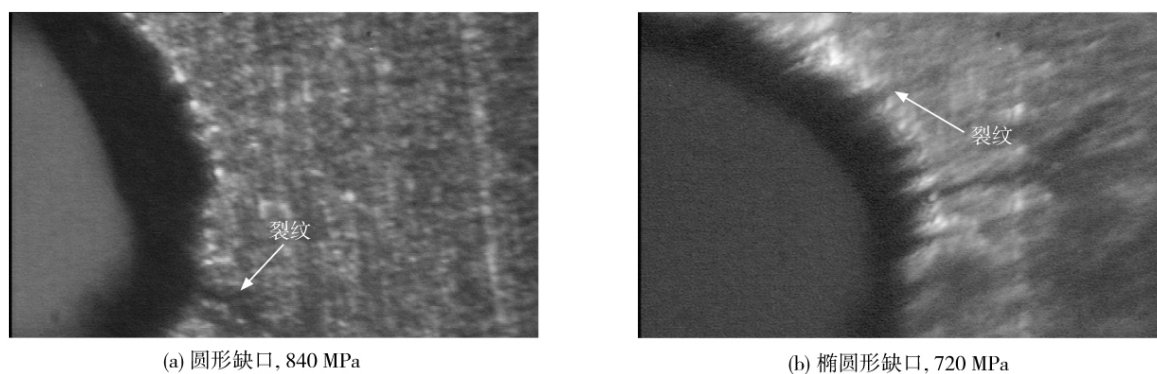


图 11 试验中观察到的 45°方向裂纹

Fig. 11 Crack in 45° direction observed in the experiments

4 结 论

通过上述分析可以得出如下结论:

1) 缺口试样在单调拉伸载荷作用下,其缺口根部进入塑性后,应力/应变分布与弹性条件下明显不同:进入塑性后,由于应力松弛,应力最大值增加并不显著,且随外载荷增大,最大应力位置向内移动。

2) 在循环载荷条件下,随着循环数的增加,缺口平分线上应力/应变范围变化不大,但缺口根部塑性区域出现明显的平均应力松弛,并逐渐趋于稳定,这导致缺口根部循环应力比与外部施加载荷应力比不同。

3) 在循环载荷作用下,塑性区域逐渐增大,但随循环数增加,增大的幅度逐渐降低,其在缺口平分线上的增长速度相对较低,由于最大剪应力的

存在,使其在缺口平分线 $\pm 45^\circ$ 方向上增长较快。

本文基于 Chaboche 黏塑性本构方程研究了应力、应变等一些力学参量在缺口根部区域随循环载荷的弹塑性响应,这可能对缺口疲劳寿命产生重要影响,因此,后续的研究工作将结合缺口试样疲劳试验,并考虑这些影响因素来开展缺口疲劳寿命的预测工作。

参考文献:

- [1] Pfouts W R, Shamblen C E, Mosier J S, et al. Materials for advanced turbine engines: volume 1 power metallurgy rene 95 rotating turbine engine Parts[R]. NASA-CR-159802, 1979.
- [2] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 244-250.
ZOU Jinwen, WANG Wuxiang. Development and application of P/M superalloy[J]. Journal of aeronautical materials, 2006, 26(3): 244-250. (in Chinese)
- [3] 王元清, 武延民, 石永久, 等. 含缺口受拉平板塑性应力场的有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 7-12.
WANG Yuanqing, WU Yanmin, SHI Yongjiu, et al. FEM analysis for plastic stress field of tensile flat slab with crackles[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(4): 7-12. (in Chinese)
- [4] Filippini M. Stress gradient calculations at notches[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(5): 397-409.
- [5] Adib-Ramezani H, Jeong J. Advanced volumetric method for fatigue life prediction using stress gradient effects at notch roots[J]. Computational Materials Science, 2007, 39(3): 649-663.
- [6] 王仁, 熊祝华, 黄文斌. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 134-140.
- [7] Chaboche J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity[J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5(3): 247-302.
- [8] 石多奇. 热端部件材料先进粘塑性本构理论与高温多轴疲劳理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
SHI Duoqi. Viscoplastic constitutive modeling and multi-axial fatigue life prediction of nickel-based superalloy at elevated temperature [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [9] 魏大盛. FGH95 粉末高温合金的变形特征及疲劳性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
WEI Dasheng. Investigation on deformation and fatigue characteristic of powder metallurgy superalloy FGH95 [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [10] Lu F, XU J Q. Evaluation of cyclic inelastic response in fretting based on unified Chaboche model[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(9): 1062-1075.
- [11] Susmel L. The theory of critical distances; a review of its applications in fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7): 1706-1724.
- [12] Yamashita Y, Ueda Y, Kuroki H, et al. Fatigue life prediction of small notched Ti-6Al-4V specimens using critical distance[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(9): 1439-1453.
- [13] Susmel L, Taylor D. An elasto-plastic reformulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notched components failing in the low/medium-cycle fatigue regime [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2010, 132(2): 021002. 1-021002. 8.
- [14] Qylafku G, Azari Z, Gjonaj M, et al. On the fatigue failure and life prediction for notched specimens[J]. Materials Science, 1998, 34(5): 604-618.