

缺口半径对疲劳寿命影响的有限元分析

金 丹^{1,2}, 田大将², 李江华², 林 伟², 陈 旭¹

(1. 天津大学 化工学院, 天津 300072;

2. 沈阳化工大学 能源与动力工程学院, 沈阳 110142)

摘 要: 针对 Mod. 9Cr-1Mo 铁素体钢缺口件进行了非比例应变路径低周疲劳试验, 采用直流电位差法测量裂纹萌生寿命, 比较了缺口半径和应变路径对疲劳裂纹萌生寿命的影响. 试验结果表明: 缺口件裂纹萌生寿命占疲劳寿命的比例与应变路径和缺口半径相关. 采用 ANSYS 软件进行模拟计算, 材料弹塑性特性采用 von Mises 屈服准则、多线性运动硬化律和单轴循环应力应变曲线描述. 模拟结果表明: 各应变路径下缺口根部处产生了明显的应力集中, 等效应力最大值均发生在缺口根部处, 随着离缺口根部距离的增加, 应力随之而降低. 但不同缺口半径下, 离缺口根部不同距离处的应力梯度变化趋势随应变路径不同而不同. 基于模拟结果, 采用 Smith-Watson-Topper (SWT) 模型进行疲劳寿命预测. 结果表明 SWT 模型针对大缺口半径的预测结果较好, 大部分点位于 2 倍分散带内, 但针对小缺口半径预测结果普遍偏低.

关 键 词: 缺口半径; 非比例应变路径; 应力梯度; 疲劳寿命预测; 裂纹萌生寿命

中图分类号: V215.5⁺5; TG155.5

文献标志码: A

Finite element analysis for the effect of notched radius on fatigue life

JIN Dan^{1,2}, TIAN Da-jiang², LI Jiang-hua², LIN Wei², CHEN Xu¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Energy and Power Engineering,

Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: A series of tests for low cycle fatigue were conducted for the notched specimens of Mod. 9Cr-1Mo ferrite steel under nonproportional loading. The crack initiation life was measured by the direct-current (DC) potential difference method. The effects of the notched radius and strain path on crack initiation life were discussed. The test results show that the ratio of the crack initiation life to the fatigue life is related to the strain path and notched radius. ANSYS software was used for simulation, while the von Mises yield criterion, multilinear kinematic hardening rule, and uniaxial cyclic stress-strain curve were employed to indicate the material elastic-plastic behavior. The simulation results show that the stress concentration at the notched root occurs significantly for any strain paths. It is obvious that the maximum equivalent stress lies in the notched root. But the stress decreases with the increase of distance. For different notched radiuses, the changing trend of the stress gradient with the distance to the notched root differs with the strain paths. Smith-Watson-Topper (SWT) model was used to predict the fatigue life based on the simulation results. The better

收稿日期: 2014-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(11102119); 国家重点基础研究发展计划(2011CB706504);

第 48 批博士后科学基金面上项目(201000480649)

作者简介: 金丹(1976—), 女, 辽宁鞍山人, 副教授, 博士, 主要从事金属材料疲劳与断裂. E-mail: jindan76@163.com

prediction results are gained for the larger notched radius and most results are in a factor-2 scatter band. But for smaller notched radius, the predictions are conservative.

Key words: notched radius; nonproportional strain path; stress gradient; fatigue life prediction; crack initiation life

随着对电力需求的不断增长,火力发电站锅炉的容量和蒸汽参数逐渐向高温、高压、大容量方向发展,Mod. 9Cr-1Mo 铁素体钢是高 Cr 铁素体耐热钢的代表钢种,以其优异的性能、较低的生产成本在我国火力发电厂动力设备中得到了日益广泛的应用^[1]. 目前针对该材料的光滑件进行了一些研究^[2-4]. 但实际工程结构的失效往往源于一些应力集中的不连续部位,近 20 多年来针对具有多轴应力状态的构件不连续部位的疲劳问题研究引起了各国学者的注意^[5-7]. 获得缺口处精确的应力-应变值是准确进行疲劳寿命预测的基础^[8],但目前为止,很难通过试验方法准确获得缺口根部局部应力应变响应.

以 Neuber 律为代表的近似方法仅局限于小塑性变形、简单的比例加载路径和启裂位置已知的简单几何结构^[9],然而对于缺口件,即使在单轴加载下,缺口根部也往往呈现为多轴应力状态. 在多轴非比例加载下,缺口附近的应力-应变历史更为复杂. 近 30 年来,随着计算机技术和计算方法的飞速发展,有限元法成为了研究缺口根部附近弹塑性应力-应变状态的有效方法之一. 通过正确选取参数和施加载荷,利用有限元程序模拟疲劳试验,来分析构件在多轴非比例疲劳载荷作用下的力学响应,进而利用疲劳理论研究多轴非比例低周疲劳问题. 许多学者采用有限元方法针对多轴应力-应变状态进行了分析^[10-12].

本文针对 Mod. 9Cr-1Mo 铁素体钢不同缺口半径的 V 型缺口件进行了常温非比例应变路径下的低周疲劳试验,比较了缺口半径和应变路径对裂纹萌生寿命和失效寿命的影响. 采用 ANSYS 软件进行多轴弹塑性有限元分析,得到各应变路径下缺口根部的应力-应变曲线,并对两缺口半径下缺口根部附近的应力梯度进行了比较. 基于模拟得到的缺口根部的应力应变结果,采用 SWT 模型进行疲劳寿命预测,并对不同缺口半径下的预测结果进行了分析.

1 试验部分

试验材料为 Mod. 9Cr-1Mo 铁素体钢,屈服

强度 $\sigma_y = 500$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 650$ MPa,弹性模量 $E = 200$ GPa,泊松比 $\mu = 0.3$. 针对缺口半径 $r_c = 0.2$ mm 和 $r_c = 0.6$ mm 两种尺寸构件进行试验,具体试件形状及尺寸如图 1 所示. 对应于 $r_c = 0.2$ mm 和 $r_c = 0.6$ mm 的弹性应力集中系数分别为 $K_{tp} = 4.2$ 和 $K_{tp} = 2.6$. 试验在多轴液压疲劳试验机上常温条件下进行,应变路径如图 2 所示,图中 $\gamma/\sqrt{3}$ 为切应变的等效值, ϵ 为应变. 控制正应变范围为 0.2%, von Mises 等效应变速率为 0.2%/s,完全对称三角波控制,标距段为 8 mm,正应力水平下降半寿命载荷的 25% 即为失效. 采用直流电位差法测量裂纹萌生寿命, N_c 为裂纹萌生寿命, N_p 为裂纹扩展寿命, N_f 为疲劳寿命.

图 3 给出了各应变路径下裂纹萌生寿命与弹

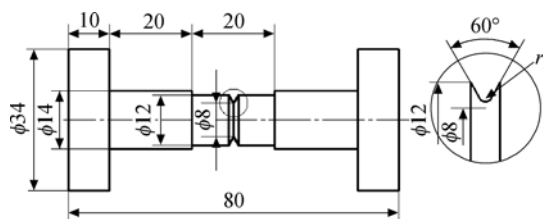


图 1 试件形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen (unit:mm)

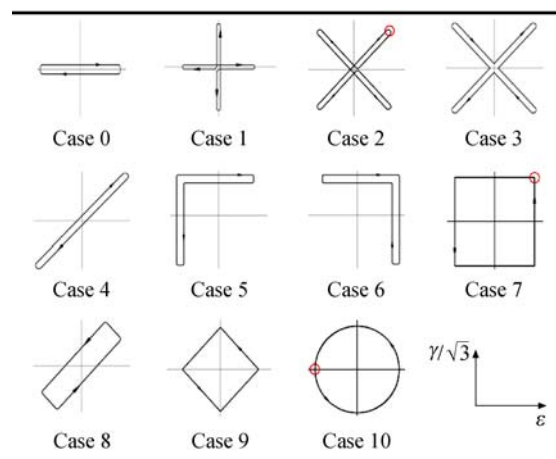
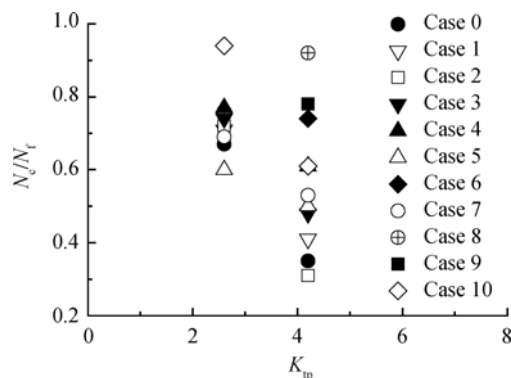


图 2 应变路径

Fig. 2 Strain paths

图3 N_c/N_f 随 K_{tp} 的变化Fig. 3 Variation of N_c/N_f with K_{tp}

性应力集中系数 K_{tp} 的关系. 总体来说, 缺口半径对裂纹萌生寿命有较大影响, $r_c=0.2\text{ mm}$ 时裂纹萌生寿命占疲劳寿命比例为 $31\%\sim 92\%$, 而在 $r_c=0.6\text{ mm}$ 时, 裂纹萌生寿命占疲劳寿命比例集中在 $60\%\sim 77\%$, 圆路径下裂纹萌生寿命稍大为 94% . 与文献[13]进行对比分析表明, 缺口件裂纹萌生寿命占疲劳寿命的比例不仅与材料类型、应变路径相关, 更与缺口半径尺寸直接相关. 同一应变路径下, 随着缺口半径增加, 裂纹萌生寿命所占比例增大; 在相同缺口半径下, 裂纹萌生寿命所占比例随应变路径非比例度的增加略有增加的趋势.

2 有限元分析

2.1 有限元建模、边界条件处理及施加载荷

使用 ANSYS 软件进行模拟分析. 针对缺口件建立三维有限元模型 ($r_c=0.6\text{ mm}$), 选用 20 节点六面体等参元 Solid95, 该单元更适合建立计算精度较高、边界为曲线的模型. 轴向单元尺寸约 1 mm , 周向角度 (围绕 z 轴的旋转方向) 约为 11° , 考虑缺口根部应力集中, 缺口部分进行细化, 其尺寸为 0.06 mm , 共产生 12498 个单元, 50969 个节点. 采用 von-Mises 屈服准则和多线性运动硬化律描述材料的弹塑性性质, 材料循环应力应变曲线定义如式(1)所示

$$\varepsilon = (\sigma/E) + (\sigma/K')^{1/n'} \quad (1)$$

式中 ε 和 σ 分别为一个循环内的应变和应力, 其中循环硬化系数 $K'=511\text{ MPa}$, 循环硬化指数 $n'=0.069$.

拉扭应变加载采用试件一端刚性固定, 一端加轴向和周向位移来实现, 具体加载时采用多个步骤来实现, 因加载路径不同, 计算步骤亦不相同, 简单路径取 32 载荷步, 复杂路径取 64 步.

2.2 缺口根部处应力应变值

完成有限元网格划分、材料属性设定、边界条件和载荷施加后, 运用 ANSYS 软件后处理计算出各单元各节点在一个循环内的正应力、正应变以及 von Mises 等效应力和应变.

图 4 给出了 $r_c=0.6\text{ mm}$ 下 case 0 应变路径缺口根部附近等效应力云图.

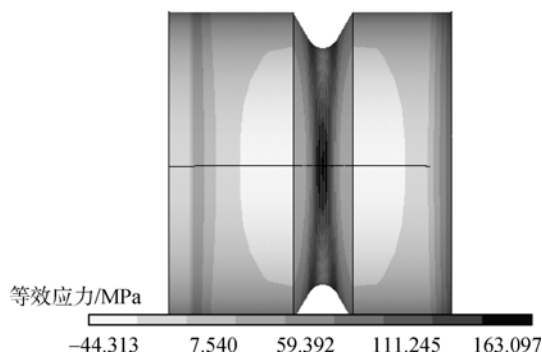


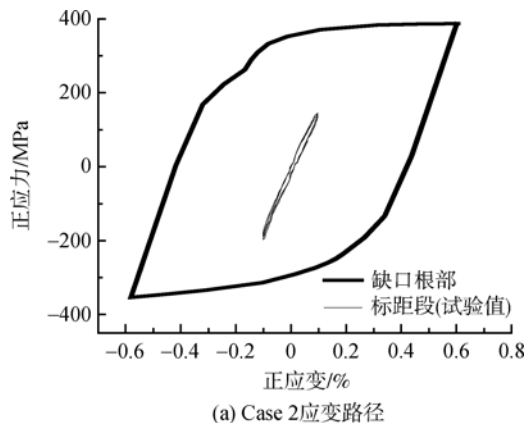
图4 缺口件的 von Mises 等效应力云图

Fig. 4 Von Mises equivalent stress contour of notched specimen

从图 4 可明显观察到缺口根部附近的应力分布, 等效应力最大点位于试件中央横剖面的缺口根部处, 即直径最小处, 与理论分析相一致.

图 5 和图 6 给出了两缺口半径 case 2 和 case 7 应变路径下缺口根部处一个循环内的应力应变的模拟结果. 图中细黑线为试验中测得的结果, 很明显在两应变路径下缺口根部处发生了明显的应力集中.

当 $r_c=0.6\text{ mm}$ 时, case 2 路径下缺口根部的正应力和正应变值分别为 388 MPa 和 0.60% , 其标距段试验值为 180 MPa , 0.096% ; 非比例程度较高的 case 7 路径下缺口根部应力应变值达到 406 MPa 和 0.86% , 标距段试验值为 202 MPa , 0.1% . 而当缺口半径 $r_c=0.2\text{ mm}$ 时, case 2 路径



(a) Case 2 应变路径

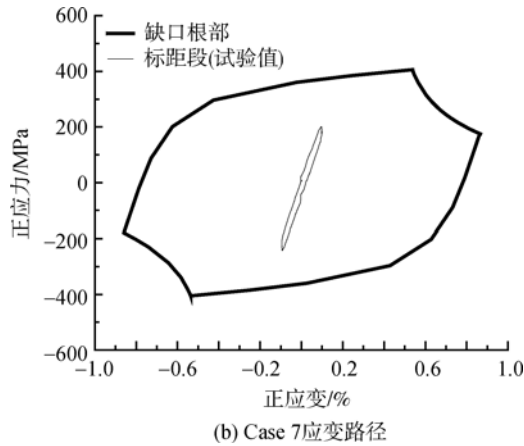


图5 $r_c=0.6$ mm时, case 2 和 case 7 应变路径下应力应变响应

Fig. 5 Stress-strain response for $r_c=0.6$ mm at strain paths case 2 and case 7

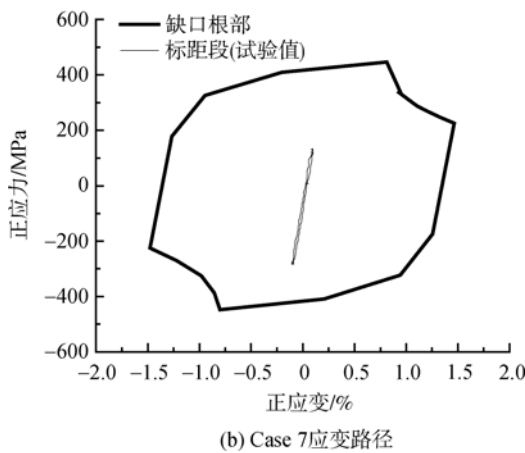
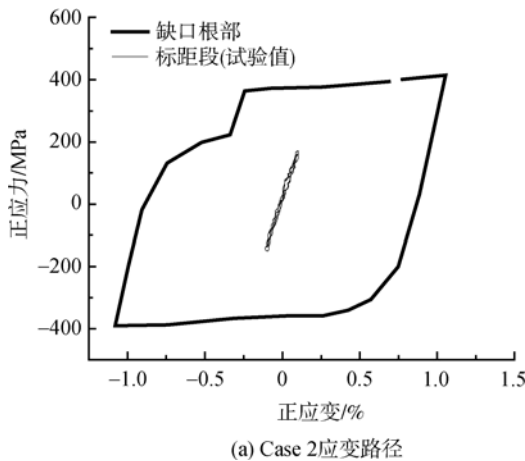


图6 $r_c=0.2$ mm时, case 2 和 case 7 路径下应力应变响应

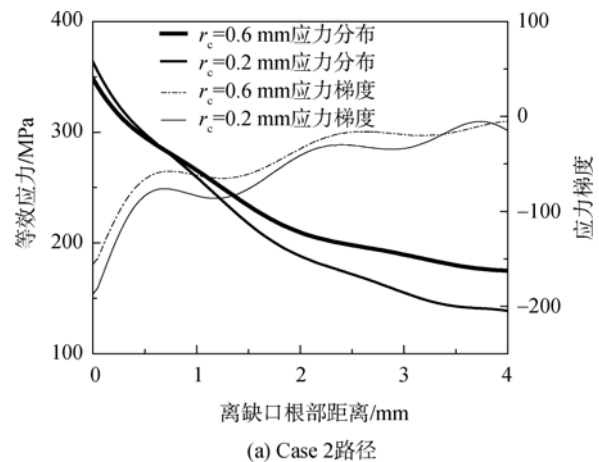
Fig. 6 Stress-strain response for $r_c=0.2$ mm at strain paths case 2 and case 7

下的缺口根部的应力应变值分别为 414 MPa 和 1.05%, 其标距段试验值为 172 MPa, 0.1%; case 7 应变路径下缺口根部应力和应变值更是达到了 447 MPa 和 1.47%, 而标距段试验值为 134 MPa, 0.1%。针对各条件下的缺口根部处的模拟结果进行分析, 可以得到相同应变路径下, 缺口半径较小时, 应力集中更加明显; 对于相同缺口半径不同非比例应变路径, 随着非比例度的增加, 最大应力值有增加的趋势。因此虽然构件的整体部分仍处于弹性状态, 但缺口附近已经进入塑性状态, 疲劳寿命预测需基于此区域进行。

2.3 缺口根部附近应力分布分析

各应变路径下等效应力最大值均发生在缺口根部处, 这与文献[14]的结果相一致, 但随着离缺口根部距离的增加, 应力随之而降低。图 7 给出了 case 2, case 7 和 case 10 应变路径两缺口半径下等效应力与距缺口根部距离间的关系, 其所对应时刻见图 2 所示。对比 3 种应变路径下的结果, 可以看出当 $r_c=0.2$ mm, 缺口根部处等效应力值大于 $r_c=0.6$ mm 缺口根部处的值, 但随着离缺口根部处距离增大, 其等效应力迅速降低。为了更好地描述这一现象采用应力梯度 $\chi=\frac{d\sigma}{dx}$ 进行说明[15]。从

图 7 中结果可以看出, 各应变路径下 $r_c=0.2$ mm 时缺口根部处的应力梯度均大于 $r_c=0.6$ mm 时的应力梯度, 应力梯度在离缺口根部距离为 1 mm, 甚至更小处基本达到稳定。不同应变路径下, 应力梯度随离缺口根部不同距离处的变化趋势并不相同, case 2 路径下, 两缺口半径应力梯度变化均较 case 7 和 case 10 路径下值小, 且在 case 7 和 case 10 路径下, 应力梯度最大值并非发生在缺口根部处。



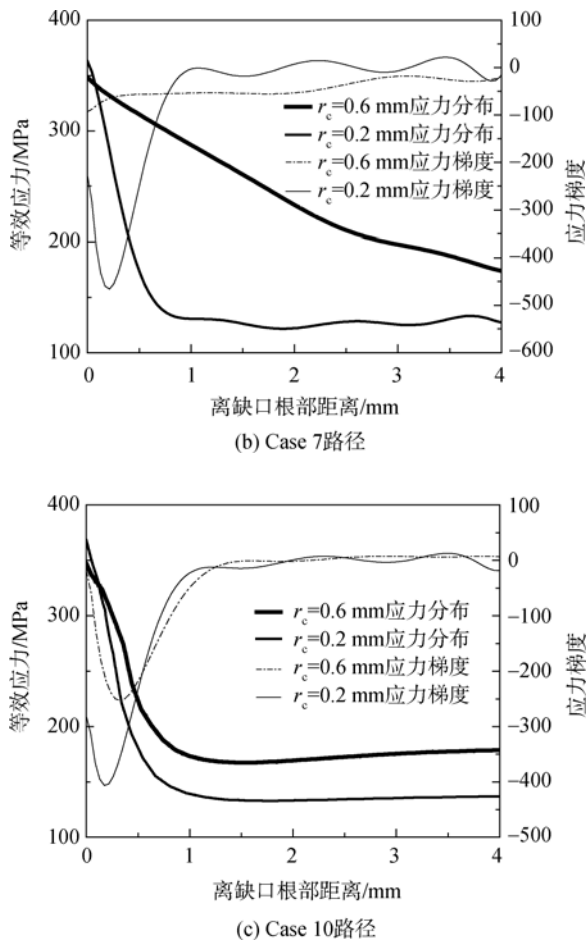


图7 等效应力与相对应力梯度随离缺口根部距离变化
Fig. 7 Equivalent stress and relative stress gradient varying with distance to notched root

3 疲劳寿命预测结果分析

在疲劳寿命预测中,临界面法得到了日益广泛的应用. SWT 模型^[16]将最大正应变面作为临界面,同时考虑该面上的最大正应力,方程如下

$$\frac{\Delta \epsilon_{\max}}{2} \sigma_n = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (2)$$

其中 σ_f' , ϵ_f' , b 和 c 分别为 Coffin-Manson 方程中的疲劳强度系数、疲劳延性系数、疲劳强度指数和疲劳延性指数,其值分别为 914, 0.475, -0.069 和 -0.590^[17]. $\Delta \epsilon_{\max}$ 为最大正应变幅值, σ_n 为最大正应变面上的最大正应力. 依据模拟得到的缺口根部处的应力、应变值进行疲劳寿命预测,结果如图 8 所示.

从图 8 可以看出 SWT 模型针对缺口半径为 0.6 mm 的预测结果较好,大部分点位于 2 倍分散带内,但针对缺口半径为 0.2 mm 的预测结果偏低. 这是由于缺口半径为 0.2 mm 时缺口根部附近应力梯度明显大于缺口半径为 0.6 mm 时缺口

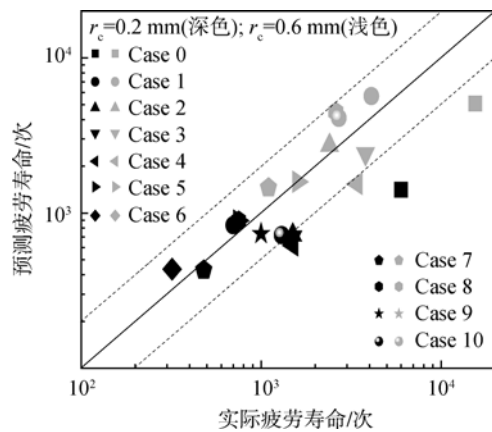


图8 SWT 模型疲劳寿命预测结果

Fig. 8 Fatigue life prediction results of SWT model

根部附近应力梯度,若采用缺口根部值进行寿命预测就会导致缺口半径为 0.2 mm 的预测结果偏低. 不同应变路径及不同缺口半径下,应力梯度值随离缺口根部不同距离其变化趋势并不相同,仅仅采用缺口根部值进行寿命预测并不合适. 本文针对缺口半径较小者预测结果偏于安全,这与先前的研究结果相一致^[18]. 如何针对不同缺口半径及非比例应变路径选取离缺口根部不同距离处的应力-应变值进行损伤估算及疲劳寿命预测,是进一步的工作.

4 结 论

基于不同缺口半径下的非比例应变路径疲劳试验结果,采用 ANSYS 软件进行应力-应变计算,结合 SWT 模型进行疲劳寿命预测,得到如下结论:

1) 对 Mod. 9Cr-1Mo 铁素体钢不同缺口半径的试验结果分析表明,缺口件裂纹萌生寿命占疲劳寿命的比例与应变路径和缺口半径尺寸直接相关. 同一应变路径下,随着缺口半径增加,裂纹萌生寿命所占比例增大;缺口半径越小,萌生寿命占疲劳寿命的比例较为分散.

2) 利用 ANSYS 软件进行有限元模拟计算,采用 von Mises 屈服准则、多线性运动硬化律和单轴循环应力应变曲线描述材料弹塑性特性. 有限元模拟结果表明,各路径下,缺口根部产生了明显的应力集中.

3) 针对两缺口半径下缺口根部附近的等效应力和应力梯度的分析结果表明,各非比例路径下等效应力最大值均发生在缺口根部处,随着离缺口根部距离的增加,等效应力随之而降低. 但不同缺口半径下,离缺口根部不同距离处的应力梯

度变化趋势随应变路径不同而不同。

4) 基于模拟结果结合 SWT 进行疲劳寿命预测,结果表明,针对缺口半径为 0.6 mm 的预测结果较好,大部分点位于 2 倍分散带内,但针对缺口半径为 0.2 mm 的预测结果偏低,这与小缺口半径下缺口根部处产生严重的应力集中有关。

参考文献:

- [1] 王卫泽,王钊,朱月梅,等. 我国 P91/T91 钢生产及其性能的现状与进展[J]. 机械工程材料,2010,34(4):6-9.
WANG Weize, WANG Yue, ZHU Yuemei, et al. Research status and advances of manufacture and properties of P91/T91 steel in China[J]. Material for Mechanical Engineering, 2010, 34(4): 6-9. (in Chinese)
- [2] Dipti S, Sumantra M, Bhaduri A K. Characterization of deformation instability in modified 9Cr-1Mo steel during thermo-mechanical processing[J]. Materials and Design, 2011, 32(2): 716-722.
- [3] Mazaheri M, Djavanroodi F, Nikbin K M. Creep life assessment of an overheated 9Cr-1Mo steel tube[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(12): 746-752.
- [4] Nani B M, Sasikala G, Shashank D B, et al. Investigation on influence of dynamic strain ageing on fatigue crack growth behaviour of modified 9Cr-1Mo steel[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 43: 242-245.
- [5] Brighenti R, Carpinteri A. A notch multiaxial-fatigue approach based on damage mechanics[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 39: 122-133.
- [6] Karlén K, Olsson K. A study of the volume effect and scatter at the fatigue limit-experiments and computations for a new specimen with separated notches [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(3): 363-371.
- [7] Chaves V, Navarro A. Fatigue limits for notches of arbitrary profile[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 68-79.
- [8] Susmel L, Taylor D. The theory of critical distances to estimate finite lifetime of notched components subjected to constant and variable amplitude torsional loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 98(1): 64-79.
- [9] Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law[J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(4): 544-550.
- [10] Anurag W, Behrooz J, Trevor S, et al. A new finite element fatigue modeling approach for life scatter in tensile steel specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(4): 685-697.
- [11] Topa M M, Ercan S, Kuralay N S. Fatigue life prediction of a heavy vehicle steel wheel under radial loads by using finite element analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 20: 67-79.
- [12] 王延荣, 李宏新, 袁善虎, 等. 考虑应力梯度的缺口疲劳寿命预测方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1208-1214.
WANG Yanrong, LI Hongxin, YUAN Shanhu, et al. Method for notched fatigue life prediction with stress gradient[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1208-1214. (in Chinese)
- [13] Tatsuo I, Sakane M. Fatigue-creep life prediction for a notched specimen of 2 1/4 Cr-1Mo steel at 600℃ [J]. Nuclear Engineering and Design, 1994, 150(1): 141-149.
- [14] 邱宝象, 高增梁, 王效贵, 等. 基于有限元法的 16MnR 缺口件疲劳寿命预测方法[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 21-27.
QIU Baoxiang, GAO Zengliang, WANG Xiaogui, et al. A fatigue life prediction method for 16MnR steel notched components based on the finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 21-27. (in Chinese)
- [15] Schijve J. Stress gradients around notches[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1980, 3(4): 325-338.
- [16] Smith R N, Watson P, Topper T H. A stress-strain parameter for the fatigue of metals[J]. Journal of Materials, 1970, 4(5): 767-778.
- [17] National Institute for Materials Science Fatigue Database. Fatigue data sheet No. 78 [EB/OL]. [2009-10-01]. <https://tsuge.nims.go.jp/MADS/ja/sheet/Fatigue.htm>.
- [18] Fatemi A, Zeng Z, Plaseied A. Fatigue behavior and life prediction of notched specimens made of QT and forged microalloyed steels[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(6): 663-672.

(编辑:陈越)