

文章编号:1674-8190(2019)04-542-08

30CrMnSiA 缺口试样低周疲劳寿命研究

谢伟,周慕莹,齐紫玉

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要: 缺口会导致严重的应力集中,并降低结构的使用寿命,研究缺口部位的低周疲劳寿命具有重要意义。基于弹塑性全量理论建立 30CrMnSiA 材料的弹塑性本构关系,采用损伤力学-有限元法预测 30CrMnSiA 材料缺口试样的低周疲劳寿命,并与相应的试验结果进行对比。结果表明:基于弹塑性全量理论建立的弹塑性本构关系方法合理,采用损伤力学方法得到的疲劳寿命预测结果基本满足工程实际要求,该方法可用于对 30CrMnSiA 缺口试样进行低周疲劳寿命预测。

关键词: 30CrMnSiA 材料;低周疲劳;缺口试样;疲劳寿命预测;有限元法;损伤力学

中图分类号: V214.1;O346.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.04.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Low Cycle Fatigue Life Prediction of 30CrMnSiA Notched Specimens

Xie Wei, Zhou Muying, Qi Ziyu

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Notches can lead to serious stress concentration and reduce the service life of structures. Therefore, it is of great significance to study the low cycle fatigue life of notches. The elastic-plastic constitutive function of 30CrMnSiA steel is presented based on the total theory of plasticity, and the low cycle fatigue life of 30CrMnSiA notched specimens is predicted by damage mechanics and finite element method. The results are compared with the corresponding experimental results. The results show that the elastic-plastic constitutive relation method based on the total elastic-plastic theory is reasonable, and the fatigue life prediction results basically meet the engineering requirements. The low cycle fatigue life prediction of 30CrMnSiA notched specimens can be carried out based on the damage mechanics method.

Key words: 30CrMnSiA material; low-cycle fatigue; notched specimen; fatigue life prediction; finite element method; damage mechanics

0 引言

无论是工程实际应用还是科研学术研究,疲劳寿命问题一直备受重视。人们通过研究应力与疲劳寿命或应变与疲劳寿命之间的关系,建立相应的

疲劳寿命预测模型,以解决结构件的高周或低周疲劳寿命预测问题,其中 Manson-Coffin 方程作为低周疲劳寿命预测模型较为常用^[1]。近几十年来,在固体力学学科中,损伤力学已被广泛用于描述结构件高周和低周疲劳的破坏过程,通过与有限元法结合,建立材料的本构关系和损伤演化方程,可以有

收稿日期:2018-09-27; 修回日期:2018-12-11

基金项目:陕西省自然科学基金(2017JM1027);中国航天科技集团公司航天科技创新基金

通信作者:谢伟,nwpuxiewei@nwpu.edu.cn

引用格式:谢伟,周慕莹,齐紫玉. 30CrMnSiA 缺口试样低周疲劳寿命研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 542-549.

Xie Wei, Zhou Muying, Qi Ziyu. Low cycle fatigue life prediction of 30CrMnSiA notched specimens[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 542-549. (in Chinese)

效地预估结构件的疲劳寿命。

I. R. Memon^[2]采用损伤力学—有限元法验证加载次序对疲劳寿命的影响规律,结果表明,基于损伤力学—有限元法得到的寿命值与试验结果基本一致;L. Guo 等^[3-5]研究发现,结构的疲劳损伤累积是一个复杂的过程,通过对关键区域的疲劳损伤进行进一步分析,简化计算过程,可有效解决实际工程问题;P. Colombi^[6]研究了人体腿骨骼的疲劳损伤过程,该类疲劳损伤累积过程属于非线性的,通过损伤力学—有限元法得到了不同加固金属结构进行修复时人体腿骨骼的疲劳损伤过程。郑旭东等^[7]在损伤步长概念的基础上,推导了疲劳裂纹形成与扩展的预估公式,预估了 2024 和 7075 两种材料多种几何参数含缺口板试件的全寿命,结果表明,预测结果与试验结果基本吻合,满足工程要求,解决了传统预估构件寿命需进行大量实验的难题,节省了时间和人力;周太全^[8]采用损伤力学—有限元法对焊接构件疲劳损伤过程进行分析,在有限元软件 ABAQUS 中编写了焊接构件全耦合疲劳损伤的用户子程序文档,实现了对焊接构件疲劳损伤分析的计算过程,得到了相关疲劳损伤累积的计算结果;唐雪松等^[9]预估了 30CrMnSiA2A 材料含沟槽轴对称试件的疲劳裂纹形成寿命,30CrMnSiA2A 材料含沟槽轴对称试件局部存在应力集中区域,疲劳过程中会发生塑性变形,在此基础上提出了一种耦合损伤的弹塑性本构方程与损伤演化方程,结果表明,疲劳寿命理论预测结果与实验结果吻合较好;张彦军等^[10]发现虽然载荷谱作用下带板连接件局部单元的应力超过材料屈服极限,但外载荷与危险点应力之间仍然呈现线性关系,在此基础上可对应力谱进行塑性修正以节省计算时间,并对比在此载荷谱下闭合解法和损伤力学—有限元法带板连接件的疲劳寿命预测值,结果表明,通过修改计算步长,可提高两种方法计算结果的一致性;关迪等^[11]在连续损伤力学和能量原理等理论的基础上,提出了一种新的低周疲劳损伤演化方程,可有效地预测金属材料的低周疲劳寿命,并以金属材料 7051-T7451 铝合金加以验证,结果表明,该方法计算获得的结果与试验结果符合较好;李国峰等^[12]基于 LY12 材料的 S-N 曲线,结合损伤力学—有限元全耦合方法分析飞机典型连接耳片结构的疲劳过程,其结果精度满足要求,可作

为工程应用的参考依据。

30CrMnSiA 材料在淬火高温回火条件下表现出较高的强度和良好的韧性,可用于制造各种特殊耐磨零部件以及砂轮轴、齿轮、活塞类零部件等,在机械、汽车、飞机等领域中均有广泛应用^[13-14]。但目前,国内外关于 30CrMnSiA 材料缺口试样的低周疲劳性能研究相对较少。因此,本文基于损伤力学—有限元方法对高强度钢 30CrMnSiA 材料缺口试样开展低周疲劳性能预测研究,并与相应的试验结果进行对比,以期为其在航空航天工业等领域的广泛应用提供理论和技术支持。

1 材料和试验

实验用材料为 30CrMnSiA 高强度钢。试验件分为光滑试样和缺口试样,试验件总长为 220 mm,加持端直径为 18 mm,长度为 60 mm。已有研究表明,缺口半径是影响缺口表面应力集中程度的主要因素。因此,设计缺口半径分别为 $R_3 = 3$ mm、 $R_4 = 4$ mm 和 $R_5 = 5$ mm,缺口深度为 1 mm 的缺口试样。试样结构和尺寸如图 1 所示。

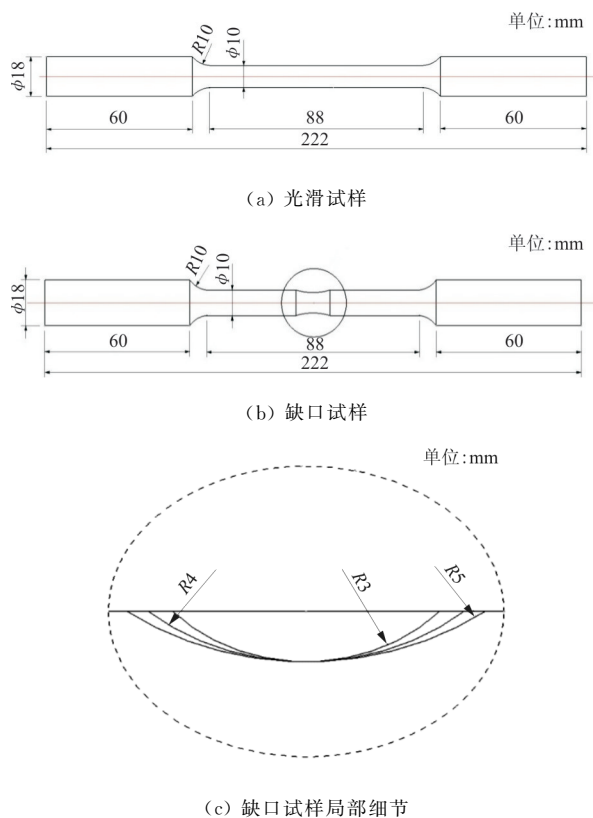


图 1 试样结构和几何示意图

Fig. 1 Structure and geometry of specimen

取 5 个光滑试样,按照 GB/T 228-2002 进行常规力学性能试验,得到材料基本性能参数,如表 1 所示,表中数据均为 5 组数据的平均值。

表 1 室温下 30CrMnSiA 材料的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of 30CrMnSiA at room temperature

参数	数值	参数	数值
泊松比	0.33	抗拉强度 σ_b /MPa	1 181.8
弹性模量 E /GPa	210.2	断后伸长率 δ /%	49.44
屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	1 115.4	断面收缩率 ψ /%	17.2

材料应力—应变关系如图 2 所示,可以看出:30CrMnSiA 材料的应力—应变曲线没有明显的屈服现象。

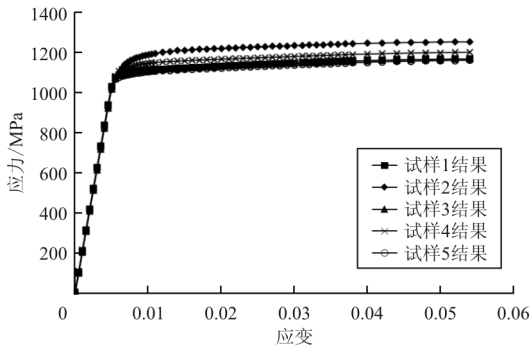


图 2 室温下 30CrMnSiA 材料的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of 30CrMnSiA material at room temperature

在实验频率为 1 Hz、应力比 R 为 0.06、加载波形为正弦波条件下对光滑试样和缺口试样分别进行低周疲劳试验。针对 R_4 型缺口试样进行最大应力分别为 672、704、723、730、770 MPa 的低周疲劳试验,对 R_3 型和 R_5 型缺口试样进行最大应力为 723 MPa 的低周疲劳试验。最大应力指的是缺口试样光滑区域处的最大应力,它使得缺口表面的最大应力在屈服极限附近且不超过抗拉极限。每个应力水平下取 10 个试验件进行试验。

由于疲劳试验得到的疲劳寿命具有分散性,分散程度的高低会影响疲劳寿命结果的准确性以及寿命预测方法选择的合理性^[15]。采用剔除平行试验数据最大值和最小值的方法对低周疲劳试验数据进行处理,处理后的低周疲劳试验结果如表 2 所示,疲劳寿命为处理后的数据取平均值。

表 2 室温下低周疲劳寿命

Table 2 Low-cycle fatigue at room temperature

序号	应力值/MPa	试件形式	疲劳寿命/循环次数
1	1 050	光滑试样	519 503
	1 100		276 841
	1 130		164 129
	1 140		79 159
	1 150		66 580
2	723	缺口试样 R_3	6 656
	723	缺口试样 R_4	8 667
	723	缺口试样 R_5	11 151
3	672	缺口试样 R_4	11 850
	704		9 975
	723		8 667
	730		8 211
	737		7 503

2 30CrMnSiA 材料弹塑性本构关系

求解弹塑性问题的困难主要来自应力—应变关系的复杂性。为了简化计算,首先应对材料应力—应变曲线加以简化^[16]。

由图 2 可知,30CrMnSiA 材料没有明显的屈服现象,因此选用线性强化弹塑性模型^[17]对 30CrMnSiA 材料的应力—应变关系进行简化。由 5 组试验数据得到的试验均值应力—应变曲线和简化后的应力—应变曲线如图 3 所示。

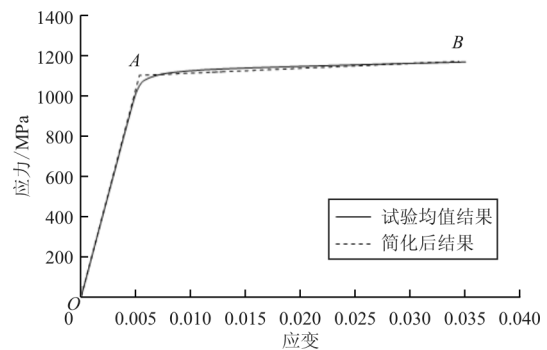


图 3 30CrMnSiA 材料应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of 30CrMnSiA material

图 3 中,对于弹性阶段 OA ,斜率为 E , $E = 210\ 020$ MPa。对于塑性阶段 AB ,斜率为 E_t , $E_t = 2\ 440$ MPa, E_t 与 E 的关系为

$$E_t = PE \tag{1}$$

式中: $P=0.011\ 6$ 。

综上,30CrMnSiA 材料的应力—应变关系可表示为

$$\sigma = \begin{cases} 210\ 020\epsilon & (\epsilon \leq \epsilon_s) \\ 2\ 440\epsilon + 1\ 099.2 & (\epsilon > \epsilon_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ_s 为屈服应力 σ_s 对应的屈服应变。

若在加载过程中,结构内任一点的应力分量都遵循同一比例,即

$$S_{ij} = tS_{ij}^0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

则该结构的加载过程满足简单加载^[17],可以用简单拉伸的应力—应变关系式表示任何应力状态的各应力分量的应力曲线。

那么,不同时刻的应力分量满足:

$$S_{ij}^n = t_n S_{ij}^0 \quad (i, j \text{ 为 } 1, 2, 3) \quad (4)$$

式中: n 为 1, 2, 3, 4, 5。

因此,不同时刻的各应力分量间的比值关系可表示为

$$\frac{S_{ij}^{n+1}}{S_{ij}^n} = \frac{t_{n+1} S_{ij}^0}{t_n S_{ij}^0} = \frac{t_{n+1}}{t_n} \quad (5)$$

通过判断 S_{ij}^{n+1}/S_{ij}^n 与 t_{n+1}/t_n 的关系,即可判断出该结构的加载过程是否满足简单加载。任取结构中的两节点,通过有限元分析对比不同时刻的应力分量与时间分量的比值关系,发现缺口试样的加载过程满足简单加载^[18]。因此,30CrMnSiA 缺口试样的 $\sigma_i - \epsilon_i$ 关系可表示为

$$\sigma_i = \begin{cases} 210\ 020\epsilon_i & (\epsilon \leq \epsilon_s) \\ 2\ 440\epsilon_i + 1\ 099.2 & (\epsilon > \epsilon_s) \end{cases} \quad (6)$$

3 损伤演化方程

在交变载荷作用下,材料性质的劣化表现为材料刚度的下降。引入损伤度 D 表示材料劣化的程度,即

$$D = 1 - \frac{E_D}{E} \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (7)$$

式中: E 为材料无损时的弹性模量; E_D 为材料损伤度为 D 时的弹性模量。

考虑损伤度后,材料含损伤时的本构关系变为

$$\sigma = E(1 - D)\epsilon \quad (8)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为应力、应变。这一本构关系反映了损伤场与应力—应变场之间的耦合关系。

选用文献[19]提出的单轴加载下的损伤演化方程,该方程可直接对弹性、弹塑性及纯脆性的损

伤进行统一描述,无需进行修改,其表达式为

$$\frac{dD}{dN} = \frac{\alpha}{p + 1} \left(\frac{1}{2E} \right)^{p+1} \frac{1}{(1 - D)^{2p+2}} [\sigma_{\max}^{2p+2} - \sigma_{th}^{2p+2}] \quad (9)$$

式中: D 为损伤度; N 为应力循环次数; σ_{\max} 为材料受到最大载荷时对应的等效应力; σ_{th} 为材料应力门槛值; α, p 为材料损伤参数。

采用文献[20]中提出的参数拟合方法,通过对表 2 中光滑试样疲劳数据进行拟合,即可获得损伤演化方程(式(9))中的各参数数值,如表 3 所示。

表 3 30CrMnSiA 材料损伤演化参数

Table 3 Damage evolution parameters of 30CrMnSiA materials

参 数	数 值	参 数	数 值
$2p+2$	3.333	σ_{th}/MPa	770
α	$4.538\ 3 \times 10^{-6}$		

4 分析流程

基于损伤力学—有限元全耦合方法,在有限元软件 ABAQUS 材料子程序中建立耦合疲劳损伤的材料模型,在应力场中引入损伤演化的影响,然后用这种损伤全耦合方法对缺口试样进行分析计算。有限元软件 ABAQUS 进行疲劳损伤力学分析的流程如图 4 所示。

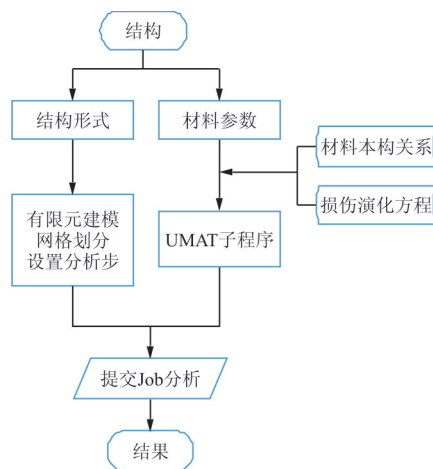


图 4 有限元软件 ABAQUS 进行疲劳损伤力学分析流程图
Fig. 4 Flow chart of fatigue damage mechanics analysis by finite element software ABAQUS

首先在有限元软件 ABAQUS 中完成对缺口试样的三维有限元建模和网格划分,为了节省计算

时间,提高计算精度,避免不收敛,对缺口表面进行局部网格细化,建立单元集合,重点输出缺口处应力集中区域的损伤变化关系。然后在 UMAT 中建立耦合疲劳损伤的材料模型,并在有限元软件 ABAQUS 提供的用户子程序接口上嵌入已编写好的 UMAT 子程序。最后提交 Job 计算,进行疲劳损伤分析。

UMAT 子程序结构损伤失效流程如图 5 所示。

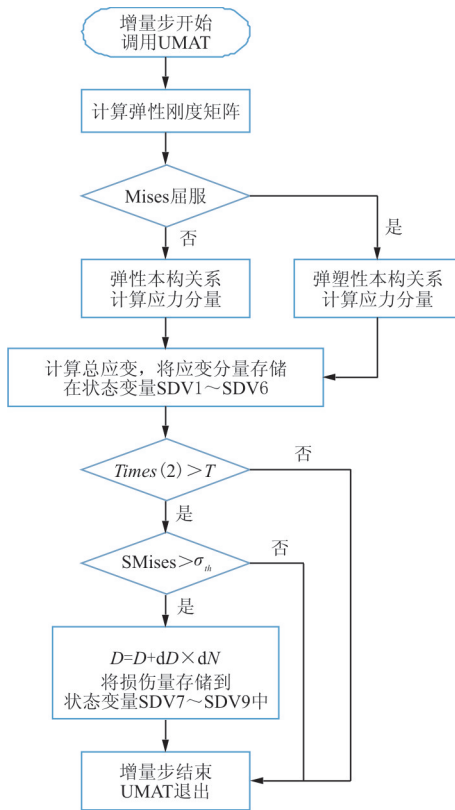


图 5 UMAT 子程序结构损伤失效流程图

Fig. 5 Flow chart of structural damage failure using UMAT subprogram

从图 5 可以看出:在进行结构疲劳损伤分析的过程中,假定结构初始损伤 $D_0 = 0$, 当 $S_{Mises} > \sigma_{th}$ 时,即缺口表面的 Mises 应力大于材料应力门槛值时,结构开始发生损伤,损伤变化量为 dD ,固定循环次数 dN 内的损伤变化量 dD 均相同,即循环次数 dN 的损伤总量为 $dD \times dN$,循环次数 dN 后单元刚度矩阵衰减并进行循环计算。由于低周疲劳总循环次数较少,可初始选定循环次数 $dN = 1000$,随着损伤量 D 的逐渐增大,可通过减小循环次数 dN 的值来获得更加准确的疲劳损伤模拟过

程。在 UMAT 子程序中,通过控制参数 $Time(2)$ 与分析步时间“ T ”的关系实现一个循环仅发生一次损伤,其中 $Time(2)$ 表示分析步开始时刻的总时间的值, T 表示小于分析步总时间“1”的时间且接近于“1”的总时间值。

5 缺口试件损伤演化分析

采用损伤力学—有限元法对 R_4 型缺口试样进行寿命预测,试样尺寸及结构示意图如图 1 所示。ABAQUS 中建立的试样有限元模型如图 6 所示,缺口部分的有限元细节如图 7 所示。

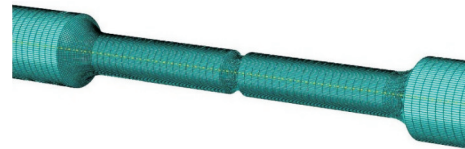


图 6 缺口试样有限元模型示意图

Fig. 6 Finite element model for notched specimen

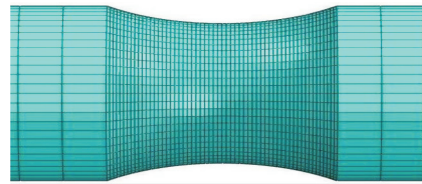


图 7 缺口细节有限元模型示意图

Fig. 7 Finite element model of the notch details

缺口试样在不同载荷水平下的疲劳损伤度随载荷循环的变化曲线如图 8 所示。 R_4 型缺口试样在最大应力为 723 MPa 时,缺口表面单元在不同疲劳寿命阶段的疲劳损伤演化过程如图 9 所示,SDV7 表示损伤度 D 。

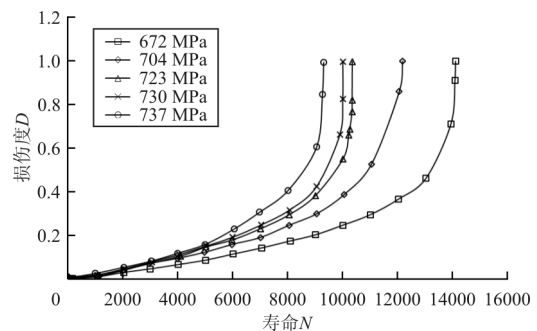


图 8 基于损伤力学—有限元法的 R_4 型缺口试样损伤—寿命曲线

Fig. 8 Damage-life curve of R_4 notched specimen based on damage mechanics-finite element method

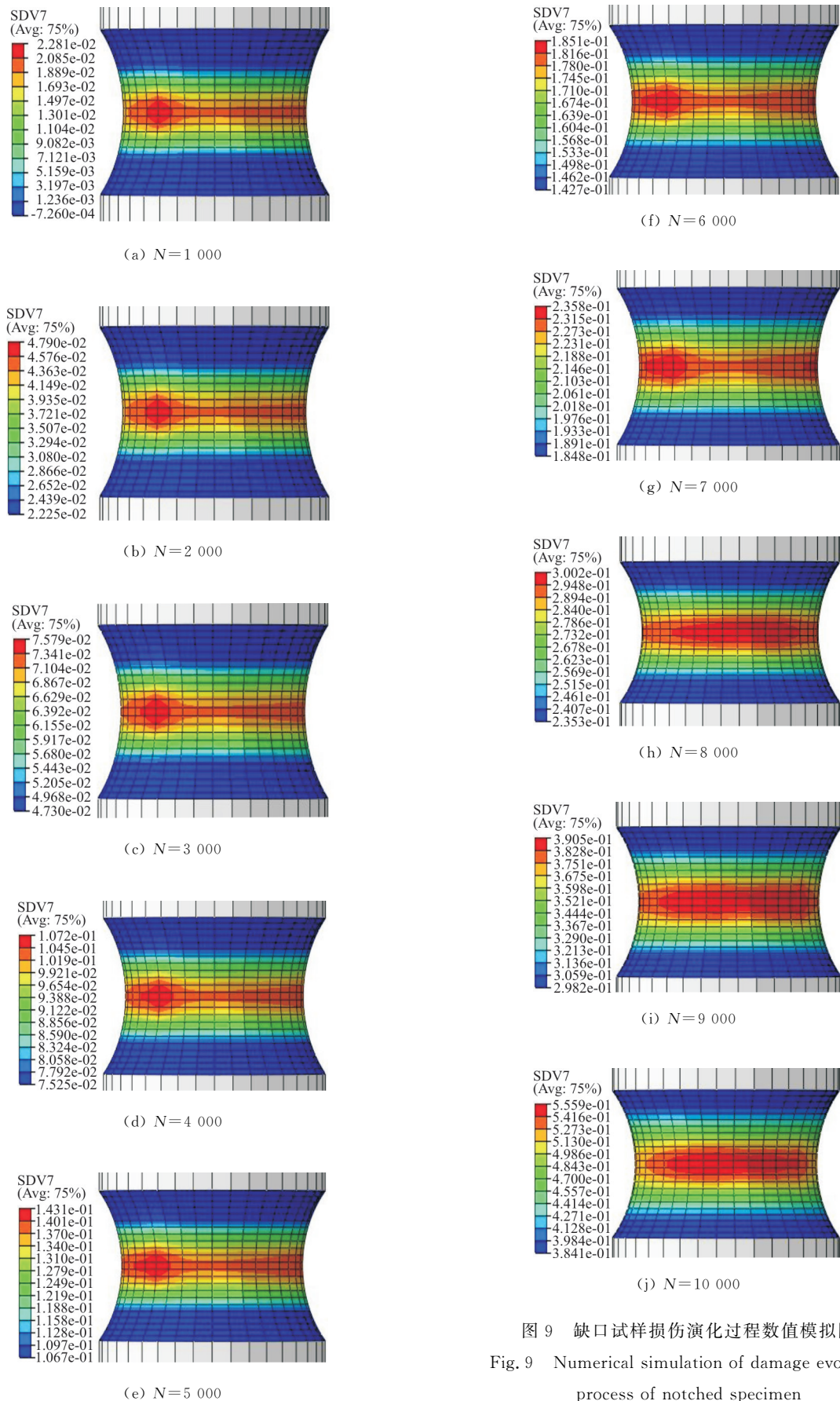


图 9 缺口试样损伤演化过程数值模拟图
Fig. 9 Numerical simulation of damage evolution process of notched specimen

从图 8~图 9 可以看出:在疲劳损伤演化过程中,缺口中心处损伤值最大,损伤程度最严重;在疲劳损伤演化过程的前期,损伤值随载荷循环变化缓慢,当损伤值达到一定范围,即到疲劳损伤后期时,损伤值随载荷循环变化迅速。可见,通过损伤力学

一有限元法模拟得到的 R_4 型缺口试样的疲劳损伤演化过程与实际低周疲劳过程相符。

基于损伤力学一有限元法的低周疲劳寿命预测结果与疲劳试验结果^[18]的对比如表 4 所示。

表 4 损伤力学一有限元法寿命预测结果与疲劳试验结果

Table 4 Prediction results by damage mechanics-finite element method and fatigue test results

应力值 S/MPa	试验均值疲 劳寿命 $N/\log N$	损伤力学一有 限元法 $N/\log N$	预测值与均值 寿命间相对误差	疲劳试验寿命 最接近值 $N/\log N$	预测值与寿命 最接近值相对误差
672	11 850/4.07	14 051/4.15	18.57%/1.98%	12 627/4.10	6.56%/0.74%
704	9 975/4.00	12 300/4.09	23.31%/2.25%	10 514/4.02	5.40%/0.50%
723	8 667/3.94	10 285/4.01	18.67%/1.78%	9 057/3.96	4.50%/0.51%
730	8 211/3.91	10 010/4.00	21.91%/2.32%	8 633/3.94	5.50%/0.77%
737	7 503/3.88	9 201/3.96	22.6%/2.06%	7 785/3.89	3.76%/0.26%

从表 4 可以看出:通过损伤力学一有限元法得到的 R_4 型缺口试样的低周疲劳寿命预测结果与试验均值疲劳寿命结果相差较大,一般在 20%左右,而与对数疲劳寿命间的误差相对较小,基本在 2%左右;考虑疲劳寿命试验数据具有一定的分散性,将损伤力学一有限元法的预测寿命与疲劳试验寿命最接近值进行对比,误差基本在 5%左右,对数疲劳寿命间的误差均在 1%以下。可见,基于损伤力学一有限元法得到的疲劳寿命值与试验寿命结果间的误差满足工程精度要求,可用来描述 30CrMnSiA 缺口试样的低周疲劳规律。

6 结 论

(1) 基于弹塑性全量理论建立的 30CrMnSiA 材料弹塑性本构关系,方法合理,可有效解决因传统本构关系带来的复杂计算问题。

(2) 通过对 30CrMnSiA 缺口试样低周疲劳寿命的分析,损伤演化曲线和损伤演化过程都反映出结构损伤累积前期缓慢后期加剧的特点,符合真实结构的破坏规律,说明损伤力学一有限元法可用来对实际结构进行低周疲劳寿命预测。

(3) 基于损伤力学一有限元法的寿命预测值与疲劳试验所测寿命间的相对误差满足工程实际要求,表明可将该方法用于工程结构的设计阶段,用来评估结构疲劳性能的优劣,减少试验费用。

参考文献

- [1] 陈凌, 蒋家羚, 范志超, 等. 低周疲劳寿命预测的能量模型探讨[J]. 金属学报, 2006, 42(2): 195-200.
Chen Ling, Jiang Jialing, Fan Zhichao, et al. Discussion of energy models for low cycle fatigue life prediction[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(2): 195-200. (in Chinese)
- [2] Memon I R. Fatigue life prediction of 3-D problems by damage mechanics with two-block loading[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(1): 29-37.
- [3] Guo L, Chan T H T, Li Z X. Analysis of dynamic response of tsing Ma bridge under running train by FEM[C]. Proceedings of International Conference on Advances in Structural Dynamics. Hong Kong, China: AIAA, 2000: 505-512.
- [4] Chan T H T, Guo L, Li Z X. Assessment of fatigue damage in the tsing Ma bridge under traffic loadings by finite element method[C]. Proceedings of the Second International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance. Hong Kong, China: AIAA, 2001: 463-472.
- [5] Tommy H T, Chan L, Guo L. Finite element modelling for fatigue stress analysis of large suspension bridges[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 261(3): 443-464.
- [6] Colombi P. Fatigue analysis of cemented hip prosthesis: model definition and damage evolution algorithms[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 895-901.
- [7] 郑旭东, 张行. 预估金属构件疲劳全寿命的损伤力学一有限元法[J]. 航空学报, 1991, 12(2): 1-9.
Zheng Xudong, Zhang Xing. Damage mechanics finite element method for prediction of total fatigue lives of metal structure members[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1991, 12(2): 1-9. (in Chinese)

- [8] 周太全. 桥梁构件局部热点应力分析及其疲劳损伤累积过程模拟[D]. 南京: 东南大学, 2003.
Zhou Taiquan. Hot spot stress analysis of steel bridge components and numerical simulation of fatigue damage accumulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2003. (in Chinese)
- [9] 唐雪松, 杨继运, 蒋持平, 等. 轴对称构件疲劳寿命预测的损伤力学—附加荷载—有限元法[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 97-101.
Tang Xuesong, Yang Jiyun, Jiang Chiping, et al. Damage mechanics-additional load-finite element method for fatigue life prediction of axisymmetrical structural members[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 97-101. (in Chinese)
- [10] 张彦军, 张森, 胡伟平, 等. 基于损伤力学方法的带板连接件疲劳寿命预估[J]. 机械强度, 2011, 33(3): 443-449.
Zhang Yanjun, Zhang Miao, Hu Weiping, et al. Fatigue life prediction of the joint plate based on damage mechanics method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(3): 443-449. (in Chinese)
- [11] 关迪, 孙秦, 杨锋平. 一个修正的金属材料低周疲劳损伤模型[J]. 固体力学学报, 2013, 34(6): 571-578.
Guan Di, Sun Qin, Yang Fengping. A modified low cycle fatigue damage model for metals[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(6): 571-578. (in Chinese)
- [12] 李国峰, 黄其青, 殷之平, 等. 基于有限元全耦合方法的耳片疲劳损伤力学分析[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 54-59.
Li Guofeng, Huang Qiqing, Yin Zhiping, et al. Analysis on fatigue damage accumulation of lug structure based on damage mechanics-finite element full-couple method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 54-59. (in Chinese)
- [13] 王东宁, 荆玉荣, 王淑花. 热处理工艺对30CrMnSi钢拉伸性能的影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37(6): 64-66.
Wang Dongning, Xing Yurong, Wang Shuhua. Influence of heat treatment technology on tensile property of 30CrMnSi steel[J]. Material & Heat Treatment, 2008, 37(6): 64-66. (in Chinese)
- [14] Claude Bathias, André Pineau. 材料与结构的疲劳[M]. 吴圣川, 李源, 王清远, 译. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Claude Bathias, André Pineau. Fatigue of materials and structures[M]. Translated by Wu Shengchuan, Li Yuan, Wang Qingyuan. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [15] 肖军, 邱绍宇, 陈勇, 等. 疲劳寿命实验曲线拟合方法选择研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(5): 129-132.
Xiao Jun, Qiu Shaoyu, Chen Yong, et al. Investigations on selection of method to fit lab-test fatigue life curve[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(5): 129-132. (in Chinese)
- [16] 俞茂宏, 马国伟, 李建春. 结构塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
Yu Maohong, Ma Guowei, Li Jianchun. Structural plasticity[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 余同希, 薛璞. 工程塑性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
Yu Tongxi, Xue Pu. Engineering plasticity mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [18] 齐紫玉. 复杂应力状态下30CrMnSiA材料低周疲劳性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
Qi Ziyu. Study on low cycle fatigue performance of 30CrMnSiA material under complex stress state [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [19] 张行. 金属构件应用疲劳损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Zhang Xing. Metal components practical fatigue damage mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [20] 杨继运. 基于损伤力学的概率疲劳曲线获取方法[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(4): 207-210.
Yang Jiyun. Method for obtaining probabilistic fatigue curve based on damage mechanics[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(4): 207-210. (in Chinese)

作者简介:

谢伟(1978—),男,博士,副教授。主要研究方向:材料和结构疲劳与断裂、可靠性分析、计算固体力学。

周慕莹(1995—),女,硕士研究生。主要研究方向:材料和结构疲劳与断裂、可靠性分析。

齐紫玉(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:材料和结构疲劳与断裂、可靠性分析。

(编辑:马文静)