

计算缺口局部应力应变的 能量法和低周疲劳寿命预测

中国科学院力学研究所 吴永礼

ENERGY METHOD FOR CALCULATING LOCAL STRESS AND STRAIN AT A NOTCH ROOT AND PREDICTION OF LOW CYCLE FATIGUE LIFE

Institute of Mechanics Chinese Academy of Science

Wu Yongli

关键词 能量法, 低周疲劳, 寿命预测。

Abstract The local stress-strain approach has been widely used to predict the low-cycle fatigue life for notched members. The life prediction using this approach requires the local stress and strain at a notch root. The elastic-plastic finite element method can be used to obtain the local stress and strain. But it requires complex computer program. Neuber's rule is a simple and commonly used method. Some papers have shown that Neuber's rule is generally more conservative than the corresponding finite element analysis. In this paper the energy method for calculating the local stress and strain at a notch root is presented. Based on the deformation theory of plasticity, it has been generalized to the plane strain condition. Numerical examples show that the fatigue life predicted by the local stress strain using the energy method agrees favourably with the experimental results.

Key words energy method, low cycle fatigue, life prediction.

局部应力应变法已成为预测结构零、部件疲劳寿命的有效方法^[1,2]。

在工程上, 常常用近似的方法来计算应力应变。其中最常用的一种近似方法就是Neuber法^[3], 其优点是计算比较简单, 但是, 所得的局部应变往往偏大, 用此应变预测疲劳寿命则偏于保守。因此, 有人^[4]提出用疲劳缺口系数来代替Neuber法中的应力集中系数。然而, 疲劳缺口系数的确定是一个复杂的问题, 因此, 限制了Neuber法的使用。文献[5]提出了计算缺口根部弹塑性应力应变的能量法, 算例表明, 能量法所得的应力应变与有限元法的结果比较接近。而能量法与Neuber法的计算公式相似, 计算量差不多, 因此, 是一个较好的方法。考虑到实际工程结构并不都是平面应力状态。因此, 根据塑性形变理论将能量法推广到平面应变情况, 这样就有可能将能量法应用到一般的平面问题。最后, 通过低循环疲劳寿命的试验结果和基于能量法的应力应变来估算的疲劳寿命比较, 表明二者结

1989年6月1日收到, 1989年9月5日收到修改稿

果比较接近。

1. 能量法的基本公式

在弹性情况下, 缺口处应力 σ 和应变 ϵ 、名义应力 σ_N 和名义应变 ϵ_N 的关系为

$$\epsilon = \sigma/E, \quad \epsilon_N = \sigma_N/E \quad (1)$$

相应的应变能密度为

$$W_\sigma = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad W_N = \int_0^{\epsilon_N} \sigma_N d\epsilon_N = \frac{\sigma_N^2}{2E} \quad (2)$$

根据理论应力集中系数的定义 $K_t = \sigma/\sigma_N$, 则

$$K_t^2 = W_\sigma/W_N \quad (3)$$

由于实际上缺口处于塑性状态, 因此, 应力应变关系为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (4)$$

假定在这种情况下式(3)仍旧成立。将式(1)和式(4)代入式(2), 然后再代入式(3)即可得出

$$\frac{K_t^2 \sigma_N^2}{2E} = \frac{\sigma^2}{2E} + \frac{\sigma}{1+\nu} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (5)$$

这就是用能量法计算缺口应力应变的基本公式。对于实际的构件, 可以先确定它的理论应力集中系数 K_t , 再从外载确定名义应力 σ_N , 于是可从式(5)算出缺口的应力 σ , 再从式(4)确定缺口处的应变 ϵ 。为了比较, 下面给出Neuber法的计算公式

$$\frac{K_t^2 \sigma_N^2}{E} = \frac{\sigma^2}{E} + \sigma \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (6)$$

比较式(5)和式(6)可以看出, 二个方法的计算公式是相似的, 只是系数略有不同。

前面的公式是基于平面应力状态的情况, 这时, 由于缺口的一个表面为自由表面, 所以缺口处的应力状态为单向应力状态, 应力应变关系可以用式(4)表示。在实际构件比较厚时, 可以认为是平面应变状态。这时, 根据塑性形变理论可以将上述公式推广到平面应变状态。这里略去公式推导过程, 只列出平面应变情况下的推算公式, 标记平面应变状态下缺口处的应力应变为 σ_1, ϵ_1 , 则有

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{1-\mu+\mu^2}}, \quad \epsilon_1 = \frac{(1-\mu^2)\epsilon}{\sqrt{1-\mu+\mu^2}} \quad (7)$$

其中

$$\mu = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \frac{E_t}{E}, \quad E_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$

从式(7)和式(8)可以由单向拉伸试验的结果 σ, ϵ 推算出平面应力状态下的 σ_1, ϵ_1 , 再用类似公式(4)的形式拟合 σ_1, ϵ_1 曲线

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} + \left(\frac{\sigma_1}{K_1}\right)^{1/n_1} \quad (9)$$

其中 $E_1 = E/(1-\nu^2)$ 。因此, 在平面应变情况下仍旧可以应用式(5)来计算缺口应力 σ_1 , 只是在公式中用 E_1, K_1, n_1 , 再从式(9)算出 ϵ_1 。

2. 在应变疲劳寿命预测中的应用

这里给出二种材料的低周疲劳试验结果和计算结果的比较。

第一种材料为GH901, 试件如图1左边所示, 载荷为程序块, 图2给出了一个载荷块的载荷情况, 共10块试件。第二种材料为GH33A, 试验的载荷为2200N~35280N之间的等幅循环。寿命预测采用考虑平均应力的应变-寿命方程

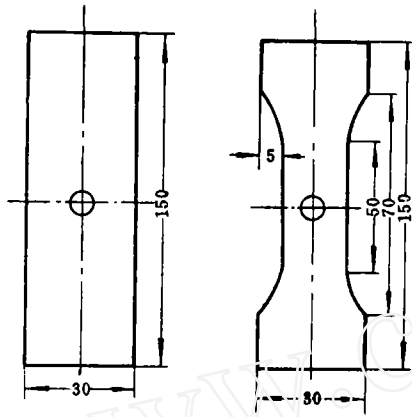


图1 试件简图(厚4mm, 孔径6mm)

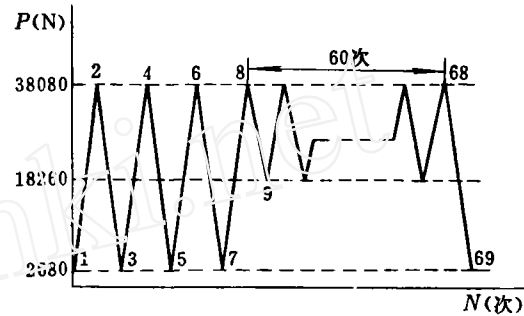


图2 GH901的一个载荷块

$$\frac{\Delta \epsilon_r}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^m + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (10)$$

两种材料的材料常数列于表1。表2列出了试验结果和有限元法、Neuber法、能量法计算缺口局部应力应变, 再用式(10)计算寿命的结果。表中的试验值是用正态统计分布分析的中值寿命。从表2可以看出, 能量法与有限元法比较接近于试验值, 而Neuber法给出的寿命偏低。GH33A的试验由于试件质量较差, 所以试验结果偏低, 若试件的质量较好, 则试验的寿命值将更接近于有限元法和能量法的计算预测寿命。

表1 材料常数

材 料	E (MPa)	σ_f' (MPa)	b	ϵ_f'	c
GH901	203840	2854	-0.145	1.6124	-0.784
GH33A	214800	1944	-0.107	0.2311	-0.491

表2 试验与计算结果的比较

材 料	试 验 值	有限元法	Neuber法	能 量 法	K_t
GH901	2800	3065	1970	2706	2.50
GH33A	27517	33107	23033	31256	2.36

参 考 文 献

- 1 Dowlig D E, Brose W R, Wilson W K. Notched Member Fatigue Life Predictions by Local Strain Approach. *Advances in Engineering*, 1977; 6:54~84

- 2 Socie D F. Fatigue-life Prediction Using Local Stress-strain Concepts. *Experimental Mechanics*, 1977; 17: (2)50~56
- 3 Neuber H. Theory of Stress Concentration for Shear -Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law. *Journal of Applied Mechanics*, 1961; 28:(4)554~550
- 4 Topper T H, Wetzel R M, Morrow J. Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens. *Journal of Materials*, 1969; 4:(1)200~209
- 5 Moliski K, Glunka G. A Method of Elastic-Plastic Stress and Strain Calculation at a Notch Root. *Material Science and Engineering*, 1981; 50:(1)93~100

(上接B182页)

中国航空学会1991年学术活动安排

序号	项目名称	时间	人数	地点	筹办单位及联系人	备注
32	环控系统通用计算机程序专题讨论会	8月	25	深圳	人体航医救生专业, 袁修平, 机载设备总公司, 杨燕生	与机载设备总公司联合
33	航空器适航管理要求、程序和方法学术交流	二季度	60	待定	民航第一研究所, 王惠生、胡文彬	
34	改进设计、加强使用维修、降低发动机和空中停车率	三季度	60	北京	民航第一研究所, 王惠生、胡文彬	
35	计划工作标准学术交流	三季度	80	沈阳	航空航天部经济研究中心, 叶家谔	
36	计算机管理信息系统实施开发学术交流	二季度	40	成都	成都飞机公司, 胡家齐	
37	航空工业生产管理标准研讨会	二季度	40	待定	航空航天部生产调度司, 姜节浩	
38	质量管理手册研讨会	三季度	40	陕西阎良	质量司, 冉拓, 172厂, 史良正	
39	危险点控制管理办法研讨会	三季度		成都	沈航赵永春, 132厂郑达铭	
40	航空工业人事劳动制度改革研讨会	一季度	100	哈尔滨	部人劳司, 诸葛庭栋	90年顺延
41	航空武器研讨合同学术研讨会		60	山东	航空航天部628所, 彭国钧	90年顺延
42	民航企业管理研讨会	10月	30	待定	民航第一研究所, 陈自业	
43	飞机复合材料结构设计经验与问题研讨会	9月	40	大连	航空航天部601所, 陈绍杰	
44	聚合物基复合材料固化工艺质量控制研讨会	6月	40	河北承德	北京航空航天大学194教研室武必兴	
45	轻型飞机动力装置学术会议	5月		湖南岳阳	航空航天部310厂	90年顺延
46	轻型无人飞机学术研讨会		40	西安	西北工业大学365所, 刘文贵	90年顺延
47	航空装备综合后勤保障研讨会	9月	60	待定	北京航空航天大学一所, 焦景堂	
48	武器装备可靠性、维修性信息管理研讨会	6月	50	待定	北京航空航天大学一所, 焦景堂	
49	结构可靠性研讨会	10月	50	待定	西北工业大学五系, 冯元生	
50	干线飞机配套传感器技术研讨会	10月	40	待定	航空航天部634所, 吴启民	90年顺延
51	航空重点试验设备立项论证研讨会	三季度	30	待定	规划院, 钟思广	90年顺延
52	全国压力计量测试新技术交流会	三季度	60	待定	航空航天部304所, 靳书元	与中国计量测试学会联合
53	航空航天计量测试技术年会	四季度	60	成都	航空航天部304所, 靳书元	

(下转B202)