

文章编号:1000-8055(2013)06-1208-07

考虑应力梯度的缺口疲劳寿命预测方法

王延荣¹, 李宏新^{1,2}, 袁善虎¹, 魏大盛¹, 石 亮¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 基于试样缺口根部区域应力分布规律,综合考虑了平均应力、应力梯度及尺寸效应的影响,发展了一种考虑梯度影响的缺口疲劳寿命预测方法.以 TC4 合金材料含两种形式缺口的试样为例,计算得到了缺口应力梯度影响因子和尺寸效应影响因子,并进行了疲劳寿命预测.寿命预测结果表明:引入缺口局部平均应力、应力梯度影响因子和尺寸效应影响因子可以较为全面地考虑缺口对试样疲劳寿命的影响,基于所发展的缺口疲劳寿命预测方法给出的 TC4 合金缺口试样疲劳寿命预测结果在 2 倍分散带以内.

关 键 词: 缺口疲劳; 平均应力; 应力梯度; 尺寸效应; 寿命预测

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Method for notched fatigue life prediction with stress gradient

WANG Yan-rong¹, LI Hong-xin^{1,2}, YUAN Shan-hu¹,WEI Da-sheng¹, SHI Liang¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

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

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: A method for fatigue life prediction of notched specimen or real component when taking the effects of mean stress, stress gradient and dimensional size into consideration was developed based on the distribution of dimensionless stress at notch root of the specimen. The factors for stress gradient and dimensional size were calculated and the fatigue life was predicted for two types of notches machined with TC4 alloy. The results show that mean stress at notch root and the factors for stress gradient and dimensional size could reflect the effects of notch on the fatigue life. Predictions based on the developed approach give estimates falling within 2-fold scatter.

Key words: notched fatigue; mean stress; stress gradient; size effect; life prediction

实际结构件的疲劳裂纹多出现在具有显著应力应变梯度的应力集中区域.以航空发动机轮盘结构设计为例,出于减轻质量、冷却以及连接需要,通常会设计剖面复杂的轮盘,并开冷却孔以及连接孔等,引起构件局部区域出现应力集中,具有较高的应力梯度,促进了构件局部疲劳裂纹萌生

并导致构件疲劳破坏,因而应力集中区域的疲劳强度成为研究和关注的重点.

经过几十年的研究和发展,对应力集中构件疲劳寿命预测的认识逐渐深入,由最初考虑名义应力发展到考虑局部应力应变,并最终认识到应力集中局部区域的平均应力、应力梯度和尺寸效

收稿日期:2012-06-11

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1208_032.html

作者简介:王延荣(1965—),男,黑龙江双鸭山人,教授,博士,主要从事航空发动机结构强度振动及可靠性研究.

应等均对疲劳寿命产生重要影响。目前,针对应力集中构件疲劳寿命的预测方法主要有名义应力法、局部应力应变法和临界距离法等。名义应力法是最早形成的抗疲劳设计方法,该法对任一构件,只要应力集中系数相同,载荷谱相同,它们的寿命就相同,因此该法需要确定构件的应力集中系数,但在实际构件中通常难以确定,且其不考虑局部塑性的影响,预测精度较低。局部应力应变法^[1-2]是一种比较成熟的缺口疲劳寿命预测方法,该法采用某些特定的方法(如 Neuber 法等)计算缺口危险部位的局部应力应变历程,再结合材料相应的疲劳特性曲线进行寿命预测,其精度相对较高,使用较为广泛,但是它仅考虑缺口危险点的应力应变,没有考虑梯度和多轴效应的影响,在缺口局部应力梯度较低时,预测精度相对较好,而应力梯度较大时,偏差较大,通常过于保守。临界距离法^[3-5]是建立在分析缺口局部区域应力应变的基础上发展起来的,该法认为缺口局部危险点周围某一临界距离或区域内的应力均对缺口构件疲劳强度产生影响,因此不同学者提出以危险点给定临界距离处的应力、给定临界距离(面积或体积)内的平均应力作为缺口局部参量来预测缺口构件疲劳寿命,由于其充分考虑了缺口局部区域的应力应变对缺口根部裂纹萌生的影响,因而预测精度较好,但是其计算较为复杂,在实际结构中临界距离难于确定,不易用于实际构件的寿命预测,仍需进一步探索。

本文在已有研究的基础上,分析了缺口疲劳寿命的诸多影响因素,结合缺口局部区域弹性应力分析,发展了一种综合考虑平均应力、应力梯度和尺寸效应影响的疲劳寿命预测方法,并采用 TC4 合金材料缺口试样的试验结果进行了验证,取得了较好的寿命预测精度。所发展的方法可为结构设计,尤其是方案设计阶段的寿命预测提供有效途径。

1 缺口疲劳寿命模型的构建

寿命预测模型的发展体现了人们对疲劳寿命认识的不断深化。1910 年, Basquin 提出了应力幅寿命关系^[6]

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

式中 σ_a 为应力幅, σ'_f 为疲劳强度系数, N_f 为疲劳寿命, 上标 b 为疲劳强度指数。

由于认识到弹性和塑性对疲劳寿命影响不同, Manson^[7]与 Coffin^[8]几乎同时提出了塑性应

变幅-寿命关系

$$\epsilon_a^p = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

式中 ϵ_a^p 为塑性应变, ϵ'_f 为疲劳延性系数, 上标 c 为疲劳延性指数。

随后, Morrow 提出基于式(1)和式(2)的总应变幅与疲劳反向数表示的寿命关系^[9]为

$$\epsilon_a = \epsilon_a^e + \epsilon_a^p = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

式中 ϵ_a^e 为弹性应变, E 为弹性模量。

为了计入平均应力效应, Morrow^[10], Smith, Watson, Topper^[11]以及 Walker^[12]分别针对平均应力的影响进行了修正

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

$$\epsilon_a \sigma_{\max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (5)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^c \quad (6)$$

式中 σ_m 为平均应力, $\sigma_{\max}$ 为最大应力, R 为应力比, 上标 r 为平均应力影响指数。

近几十年,随着研究手段的发展,对疲劳寿命各种影响因素的认识逐渐深刻,本文针对疲劳寿命分析中常见的 3 种主要因素,将其引入疲劳寿命预测模型中,建立了一种新的考虑多种影响因素的寿命预测模型。

1.1 平均应力的影响

针对缺口试样,由于应力集中的存在,导致缺口局部有较高应力,当构件大部分仍处于弹性状态时,缺口局部已经进入塑性,特别是在外载荷为非对称的条件下,导致缺口局部应力比已不同于施加的外载荷^[13],因而势必需要考虑缺口局部应力比的影响。

关于平均应力对疲劳寿命影响,普遍认为在循环载荷作用下平均应力会显著增加或降低构件的裂纹萌生寿命,因而很多研究者,如 Morrow, Smith, Watson, Toper 和 Walker 等都提出了各自的平均应力修正模型,并在疲劳寿命预测中得到了广泛使用,文献^[14]对目前广泛应用的考虑平均应力影响的 4 种模型进行了对比, Walker 平均应力寿命预测模型由于其含有可调整的 γ 项,因而可以获得更好的寿命预测精度,其寿命方程见式(6),本文即采用 Walker 寿命方程考虑缺口局部平均应力对缺口疲劳的影响。

1.2 应力梯度的影响

由于应力集中导致缺口局部区域应力下降较快,具有较高的应力梯度,目前已经广泛认识到应力梯度对于评价缺口疲劳强度有重要影响^[15],将应力梯度引入计算,以考虑梯度对寿命的影响,然而怎样考虑梯度影响尚不统一,仍需进一步探索.在考虑应力梯度影响的方法中最具代表性的是修正的体积法^[16]和应力场强法^[17],但是体积法对缺口根部的应力梯度计算要求较高,对于应力集中较高的缺口试样是比较难于准确计算应力梯度的;场强法计算梯度较为简单,但是其缺口破坏区域的尺寸难于确定,需要试验确定,在实际构件上更加难于确定,为此本文进行了相关分析.为探索其中的规律,在单调拉伸载荷作用下,将不同缺口试样沿缺口平分线应力和距离均归一化,如图1所示.图中给出了应力集中系数分别为 $K_t=3$ 和

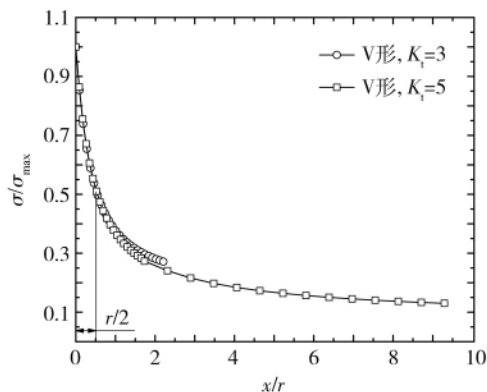
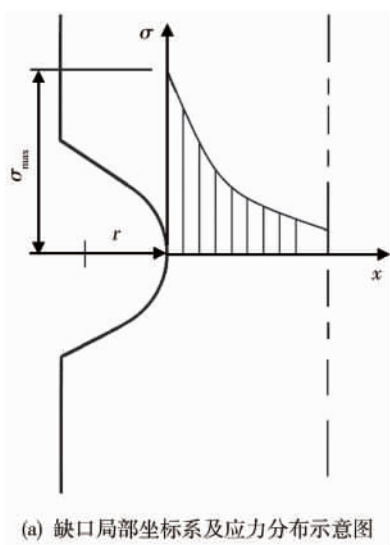


图1 不同缺口归一化应力沿缺口平分线归一化距离上的分布

Fig. 1 Normalized stress distribution along normalized symmetric path for different notches

$K_t=5$ 的 V 形缺口试样计算结果. $\sigma_{\max}$ 为缺口根部最大应力, σ 为缺口平分线上不同位置处的应力, x 为距缺口根部的距离, r 为缺口根部的曲率半径. 可以看出当缺口平分线上应力和距离均归一化后, 缺口根部归一化距离小于 0.5 时, 不同缺口形式的试样其缺口平分线上的归一化应力几乎相同, 因而本文提出的应力梯度影响因子定义如下:

定义 1

$$Y = \frac{1}{2S_{0.5}} \quad (7)$$

式中 $S_{0.5}$ 为应力归一化曲线与坐标轴在 $0 \leq x/r \leq 0.5$ 区间上围成的面积. 之所以采用这种定义是因为: 一方面, 当应力均匀分布即没有应力集中时, 应力梯度影响因子为 1.0, 此时无梯度影响; 另一方面, 采用积分求面积的方法而不是直接求梯度是为了避免缺口根部由于数值求导带来的误差. 将该应力梯度影响因子对缺口局部应力应变进行修正, 以建立缺口试样与光滑试样的对应关系, 得到的寿命修正方程为

$$\epsilon_a = Y^m \left\{ \frac{\sigma'_f}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R'}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R'}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^c \right\} \quad (8)$$

式中 R' 为缺口局部应力比, m 为应力梯度影响指数, 表征应力梯度的影响程度. 通过对航空材料手册中多种材料试验数据分析发现, m 与试验寿命存在如下关系:

$$m = A(2N_f)^B \quad (9)$$

式中 A 和 B 为常数, 可通过试验数据拟合得到.

1.3 尺寸效应的影响

处于非均匀应力场中的不同构件, 即使危险点应力相同, 但如果应力梯度分布不相同, 导致其疲劳破坏区域大小和疲劳寿命不相同, 这即是造成处于非均匀应力场的构件疲劳强度尺寸效应的重要原因^[18], 因而需要考虑非均匀应力场带来的尺寸效应. 图2给出了两种 V 形缺口试样缺口平分线上仅应力归一化的分布规律, 可以看出: 由于应力集中程度不同, 导致其影响寿命的距离和梯度也不尽相同, 因而本文提出引入平均应力梯度来刻画尺寸效应的影响.

定义 2

$$g_c = \frac{\sigma_{\text{nom}}|_{x=r/2} - \sigma_{\text{nom}}|_{x=0}}{r/2} \quad (10)$$

式中 σ_{nom} 为缺口平分线上归一化应力.

基于材料手册中通常给出 $K_t=3$ 缺口试样

的试验数据,因而以 $K_t=3$ 试样缺口处平均应力梯度定义尺寸影响因子.

定义 3

$$C = \frac{g_c}{g_3}$$

(11)

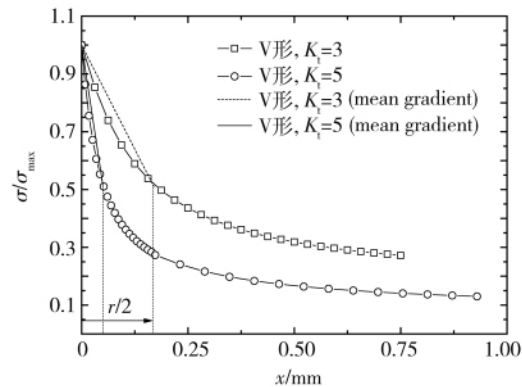


图 2 不同缺口归一化应力沿缺口平分线的分布

Fig. 2 Normalized stress distribution along symmetric path for different notches

此处选取缺口平分线上距离为 $r/2$ 来定义平

均应力梯度 g_c 以用于确定尺寸影响因子 C ,一方面是因为当 $x \leq r/2$ 时, C 值变化很小,比较稳健;另一方面是因为梯度影响因子中选取的是归一化距离为 0.5,便于统一. 将尺寸影响因子引入到应力梯度的影响中,和应力梯度共同对缺口局部应力应变进行修正,最终得到综合考虑平均应力、应力梯度和尺寸效应的缺口疲劳寿命预测方程为

$$\epsilon_a = Y_m C^\alpha \left\{ \frac{\sigma'_f}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R'}{2} \right)^{(1-\gamma)/b} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R'}{2} \right)^{(1-\gamma)/b} \right]^c \right\}$$

(12)

式中 α 为尺寸效应影响指数,可通过试验数据拟合获得.

2 TC4 合金材料缺口试样疲劳寿命预测

为考查所发展的寿命预测方法的准确性,采用 TC4 合金材料缺口试样的疲劳试验数据进行验证,TC4 合金材料室温条件下疲劳试验结果见表 1.

表 1 TC4 合金材料室温疲劳性能^[19]

Table 1 Fatigue properties of TC4 alloy at room tempeture

		$N_f=5\times 10^3$ cycles			$N_f=10^4$ cycles			$N_f=5\times 10^4$ cycles			$N_f=10^5$ cycles		
		$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=5$	$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=5$	$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=5$	$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=5$
$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$R_{0.1}$	945	580	410	845	480	360	670	315	245	620	280	205
	R_{-1}	740	395	300	640	330	250	470	220	150	425	190	120

2.1 平均应力修正参数的确定

利用 TC4 合金材料光滑试样不同应力比条件下的疲劳试验数据,拟合得到 Walker 平均应力修正寿命方程中的参数见表 2.

表 2 Walker 寿命方程中的参数

Table 2 Parameters of Walker life equation

σ'_f	b	γ	ϵ'_f	c
2503.609	-0.14091	0.42391	3299.134	-2.01311

图 3 给出了基于 Walker 平均应力修正的寿命预测结果,可以看出对不同应力比 R 条件下的光滑试样,寿命预测结果与试验结果均取得了很好的一致性.

2.2 梯度影响因子的确定

确定应力梯度影响因子,需要对缺口试样进

行弹性有限元分析,以得到缺口平分线上应力分布规律. TC4 合金材料圆棒缺口试样轴对称模型弹性有限元分析结果如图 4 所示,根据缺口根部

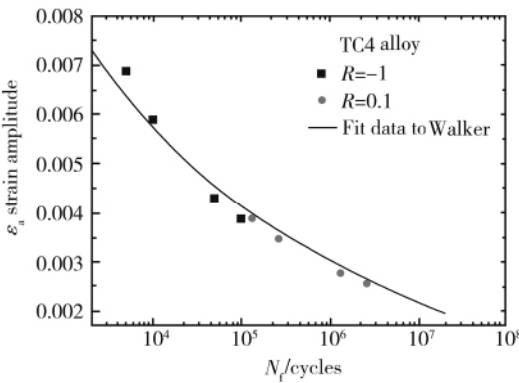


图 3 Walker 平均应力修正的寿命预测曲线

Fig. 3 Walker's mean stress modified life prediction curve

局部应力分布,求得应力梯度影响因子 $Y=1.44$.

应力梯度影响指数则需要采用 $K_t=3$ 缺口试样试验数据拟合得到,此处采用 $K_t=3, R=-1$ 和 $R=0.1$ 条件下的缺口试样试验数据进行拟合,拟合结果如图 5 所示,其中 $A=17.396, B=-0.271$.

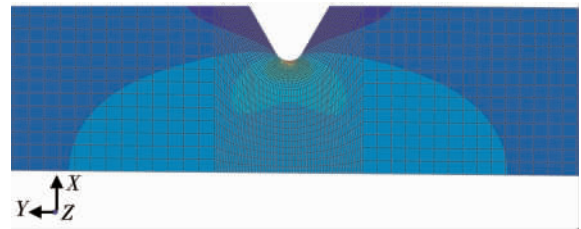


图 4 $K_t=3$ 缺口试样弹性应力分布

Fig. 4 Elastic stress distribution for $K_t=3$ notched specimen

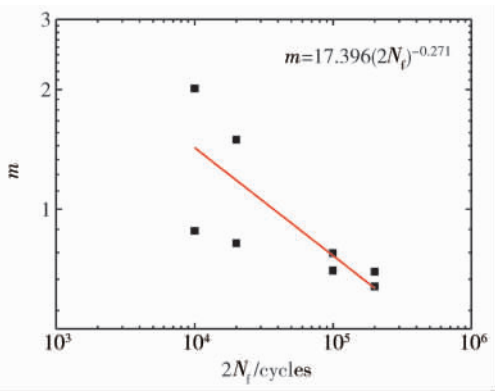


图 5 梯度影响指数 m 与 $2N_f$ 的关系

Fig. 5 Gradient effect exponent m versus $2N_f$

2.3 尺寸影响因子的确定

计算所得 TC4 合金材料 $K_t=3$ 和 $K_t=5$ 缺口试样缺口平分线上归一化应力分布如图 6 所示,计算所得不同距离上的 g_c 和尺寸影响因子 C 结果见表 3. 可以看出在缺口平分线上 $x \leq r/2$ 时,尺寸影响因子 C 的数值变化很小,比较稳健,这也充分说明选取缺口平分线上距离 $x=r/2$ 求平均梯度是合理的.

求得尺寸影响因子 C 之后,采用 $K_t=5, R=-1$ 和 $R=0.1$ 条件下的缺口试样试验数据确定尺寸效应影响指数 α ,由 $K_t=5$ 缺口试样试验数据求得的尺寸效应影响指数 α 值见表 4,求算数平均值可得 $\alpha=0.3811$.

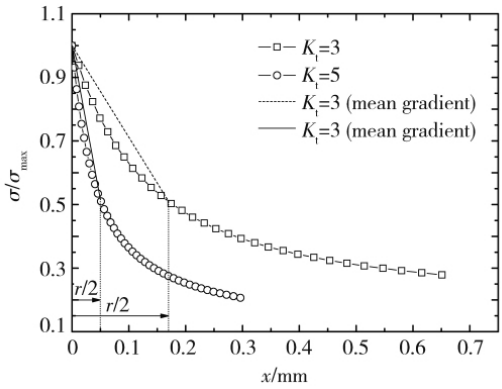


图 6 TC4 合金材料缺口试样缺口平分线归一化应力分布

Fig. 6 Normalized stress distribution along symmetric path for notched specimens of TC4 alloy

表 3 不同距离上的 g_c 值

Table 3 Values of g_c at different distances

g_c	数值	g_c	数值
$g_{3 r/4}$	-3.929	$g_{3 r/2}$	-2.883
$g_{5 r/4}$	-13.185	$g_{5 r/2}$	-9.698
$C_{r/4}$	3.356	$C_{r/2}$	3.364

表 4 α 值

Table 4 Values of α

K_t	R	$N_f/\text{cycles}^{[19]}$	C^a	α
5	-1	5 000	2.216	0.656
		10 000	2.169	0.638
		50 000	1.517	0.344
		100 000	1.257	0.189
		5 000	1.088	0.07
5	0.1	10 000	1.186	0.141
		50 000	1.703	0.439
		100 000	2.002	0.572

2.4 缺口试样寿命预测

对试验条件下 TC4 合金材料缺口试样,采用 Neuber 法计算局部应力应变及局部应力比,将计算结果代入修正的寿命预测方程,局部应变幅、应力比和寿命预测结果见表 5 和图 7. 可以看出:所发展的方法对 TC4 合金材料缺口试样疲劳寿命预测结果基本在 2 倍分散带以内,精度较好.

表 5 Neuber 法计算缺口局部应变幅、应力比和寿命预测结果

Table 5 Local strain amplitude and stress ratio at notch root by Neuber's rule and life prediction results

	应力(载荷)比 R	ϵ_a	局部应力比 R'	$N_f/\text{cycles}^{[19]}$	N_f/cycles
$K_t=3$	-1	0.013 135	-1.0	5 000	2 538
		0.009 84	-1.0	10 000	6 541
		0.006 025	-1.0	50 000	49 060
		0.005 2	-1.0	100 000	98 853
	0.1	0.007 22	-0.457	5 000	10 467
		0.005 915	-0.269	10 000	16 935
		0.003 88	0.023 1	50 000	63 075
		0.003 445	0.055	100 000	122 624
$K_t=5$	-1	0.019 995	-1.0	5 000	2 259
		0.014 535	-1.0	10 000	4 896
		0.006 93	-1.0	50 000	53 927
		0.005 505	-1.0	100 000	138 123
	0.1	0.009 875	-0.638	5 000	10 624
		0.008 215	-0.553	10 000	20 468
		0.005 41	-0.189	50 000	44 234
		0.004 525	-0.056	100 000	87 284

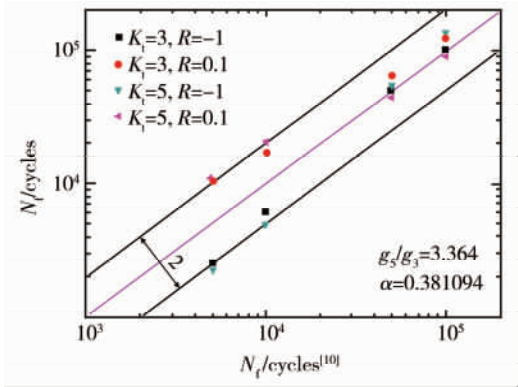


图 7 TC4 合金材料缺口试样疲劳寿命预测

Fig. 7 Fatigue life prediction for notched specimens of TC4 alloy

3 结 论

通过分析对缺口疲劳寿命的主要影响因素,发展了一种新的综合考虑平均应力、应力梯度和尺寸效应影响的疲劳寿命预测方法,并以 TC4 合

金属材料缺口试样试验数据为例进行了验证,取得了较好的寿命预测结果.

1) 由于局部塑性应变的存在,缺口局部应力比并不等同于外部施加载荷的应力比,采用 Walker 平均应力修正模型可以较好地考虑局部平均应力的影响.

2) 在不同形式缺口局部归一化应力-距离分析的基础上,提出了表征应力梯度影响的应力梯度影响因子和影响指数,将应力梯度的影响引入了寿命方程.

3) 通过对比不同应力集中系数的缺口应力分布,提出了非均匀应力场条件下的尺寸效应影响因子,并将其与应力梯度影响因子结合引入寿命预测方程,从而建立了较为完整的考虑缺口疲劳寿命影响因素的疲劳寿命预测方程.

4) 相比于传统寿命预测方法仅需要光滑试样应力-寿命曲线,由于综合考虑不同影响因素,本文所发展的新方法需要开展光滑试样对称和非对称循环疲劳试验以及两种应力集中系数缺口试样疲劳试验.

本文所发展的方法仅需要通过弹性计算获得应力集中区域应力应变,避免了实际结构中难于确定应力集中系数 K_t 和缺口疲劳系数 K_f 的问题,为更有效地利用目前中国航空材料手册^[19]中的试验数据预测实际构件的疲劳寿命提供了切实可行的途径。

参考文献:

- [1] Topper T H, Wetzel R M, Morrow J. Neuber's rule applied to fatigue of notched specimens[J]. Journal of Materials, 1969, 4(1): 200-209.
- [2] Dowling N E, Brose W R, Wilson W K. Notched member fatigue life prediction by the local strain approach[J]. Advances in Engineering Fatigue under Complex Loading SAE, 1977, 6(1): 55-84.
- [3] 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.
- [4] Luca S. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7): 1706-1724.
- [5] Luca S, David T. 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(1): 1-8.
- [6] Basquin O H. The exponential law of endurance tests[J]. American Society for Testing and Materials Proceedings, 1910, 10(6): 625-630.
- [7] Manson S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress[R]. [S. l.]: Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute, 1953.
- [8] Coffin L F, Jr. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal[J]. Transactions of ASME, 1954, 76: 931-950.
- [9] Morrow J D. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals[R]. Philadelphia, PA: In Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM, STP 378, American Society for Testing and Materials, 1965: 45-86.
- [10] Morrow J D. Fatigue design handbook section 3. 2[J]. SAE Advances in Engineering, Society for Automotive Engineers, 1968, 4(1): 21-29.
- [11] Smith K N, Watson P, Topper T H. A stress-strain function for the fatigue of metals[J]. Journal of Materials, 1970, 5(4): 767-778.
- [12] Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum[J]. American Society for Testing and Materials, 1970, 462(1): 1-14.
- [13] 袁善虎, 魏大盛, 王延荣. FGH97 缺口试样基于粘塑性本构的弹塑性响应分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2348-2355.
YUAN Shanhu, WEI Dasheng, WANG Yanrong. Analysis of elastoplastic in FGH97 notched specimens based on viscoplastic constitutive model[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2348-2355. (in Chinese)
- [14] Dowling N E. Mean stress effects in stress-life and strain-life fatigue[R]. Society of Automotive Engineers, Inc., Technical Paper F2004/51, 2004.
- [15] Filippini M. Stress gradient calculations at notches[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(5): 397-409.
- [16] 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.
- [17] YAO Weixing, XIA Kaiquan, GU Yi. On the fatigue notch factor, K_f [J]. International Journal of Fatigue, 1995, 17(4): 245-251.
- [18] Stamoulis K, Giannakopoulos A E. Size effects on strength, toughness and fatigue crack growth of gradient elastic solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(18/19): 4921-4935.
- [19] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.