

文章编号:1000-8055(2012)05-1105-08

基于临界距离理论的 TC4 合金缺口试样 低循环疲劳寿命预测

辛朋朋, 胡绪腾, 宋迎东

(南京航空航天大学 能源与动力学院

机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 对 TC4 合金缺口试样的临界距离和低循环疲劳寿命分别进行了分析和预测. 研究了缺口临界距离与疲劳寿命、载荷比、应力集中系数的相关关系及其对寿命预测结果的影响. 研究表明: TC4 合金缺口试样的临界距离不仅与疲劳寿命有关, 还与载荷比和应力集中系数相关. 载荷比相同时, 临界距离与疲劳寿命之间可采用幂函数经验公式来描述. 载荷比为 -1 和 0.1 时, TC4 合金缺口试样的临界距离-疲劳寿命曲线基本重合, 当载荷比增大为 0.5 时, 临界距离明显增大. 载荷比和疲劳寿命相同时, 临界距离与应力集中系数近似成反比关系. 寿命预测结果表明: 采用临界距离理论预测 TC4 合金缺口疲劳寿命时, 要获得更准确的疲劳寿命预测结果, 应同时考虑临界距离与疲劳寿命、载荷比以及应力集中系数等因素的相关性.

关 键 词: 缺口; 低循环疲劳; 寿命预测; 临界距离理论; Walker 等效应变

中图分类号: O346.2

文献标志码: A

LCF life prediction for TC4 alloy notched specimens based on theory of critical distance

XIN Peng-peng, HU Xu-teng, SONG Ying-dong

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Low cycle fatigue (LCF) life prediction and critical distance analysis for TC4 alloy notched specimens were conducted. The correlation between the critical distance and fatigue life, load ratio, stress concentration factor and their influence on the fatigue life prediction were studied. The result suggests that the critical distance of TC4 alloy is not only related to the fatigue life, but also to the load ratio and stress concentrate factor. For the same load ratio, the power function can be used to describe the relationship between the critical distance and the fatigue life. For TC4 alloy notched specimens, when the load ratios were -1 and 0.1 , the critical distance-fatigue life curves almost coincide; when the load ratios rose up to $R=0.5$, the critical distance increased obviously. For the same load ratio and fatigue life, the critical distance of TC4 alloy notched specimens was approximately inverse to the stress concentrate factor. Life prediction results show that the correlation between critical distance and fatigue life, load ratio, stress concentration factor must be considered to obtain more accurate fatigue life prediction for notched TC4 alloy using the theory of critical distance.

收稿日期: 2011-06-09; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1105_021.html

基金项目: 基础科研计划; 南京航空航天大学基本科研业务费专用科研项目(NS2010038)

作者简介: 辛朋朋(1988—), 男, 江苏沛县人, 硕士生, 主要从事结构强度与疲劳寿命研究.

Key words: notch; low cycle fatigue; life prediction; theory of critical distance; Walker equivalent strain

几十年的研制和使用经验表明低循环疲劳是航空发动机一些重要结构件(如轮盘)失效破坏的主要原因,是其耐久性寿命的主要限制因素。准确的疲劳定寿对保证发动机使用的安全性和耐久性具有重要意义。因此低循环疲劳寿命预测方法一直是发动机结构强度领域的重要研究内容之一。

疲劳裂纹通常是在结构几何发生突变的孔、缺口等应力集中部位首先发生。传统的局部应力应变法是以应力集中部位的最大循环应力或应变来预测结构的低循环疲劳寿命(裂纹起始寿命),即所谓的“热点”法。然而结构应力集中区域往往存在较大的应力/应变梯度,以最大循环应力或应变预测的疲劳寿命往往过于保守。随着对发动机推质比等性能要求的不断提高,意味着对发动机结构效率的要求(轻质可靠)也将不断提高。因此传统的局部应力应变法(即“热点”法)将不能满足对疲劳寿命预测准确度不断提高的要求。

传统局部应力应变法预测结果之所以偏于保守主要是由于没有考虑结构应力集中部位的应力应变分布(即应力应变梯度效应)。疲劳裂纹虽然倾向于首先在最大循环应力或应变部位萌生,然而所谓疲劳裂纹起始寿命预测实际上是指裂纹萌生扩展至一定尺寸的寿命(即包含了疲劳裂纹的早期扩展阶段)。因此当裂纹在应力集中部位萌生并扩展后,裂纹尖端将很快偏离最大应力和应变部位。即缺口根部裂纹萌生并扩展后,缺口根部的最大循环应力、应变对随后裂纹扩展的贡献将减小。因此仅以应力集中区域的最大循环应力或应变预测疲劳裂纹起始寿命是偏于保守的。

针对缺口疲劳问题,Neuber^[1]和 Peterson^[2]曾分别提出考虑缺口根部应力分布的疲劳极限(或疲劳强度)预测思想。Neuber 提出以距缺口根部一定距离内弹性应力的平均值作为有效应力, Peterson 则以距缺口根部一定距离上某一点的应力作为有效应力。近年来, Taylor, Sumel 等人^[3-5]在上述思想的基础上发展了统一的临界距离理论(theory of critical distance, 简称为 TCD),并将基于 Neuber 思想的方法称为“线法”,将基于 Peterson 思想的方法称为“点法”,另外还有“面法”,即以距缺口根部一定距离内面积上的平均应力作为有效应力。近 10 年来,许多学者先后将临界距离理论应用于缺口疲劳极限预测、静强度预

测等问题的研究,得到了较好的结果^[6]。

最近, Susmel, Yamashita, YANG Xiaoguang 等少数中外学者进一步尝试将临界距离理论应用于缺口试样的中/低循环疲劳寿命预测研究,得到了一些初步的研究结果^[7-10]。结果显示临界距离理论可以考虑缺口应力集中区域应力、应变分布对疲劳过程区的影响,对预测缺口疲劳寿命具有潜在的优势。但他们的研究结果也表明要切实提高缺口疲劳寿命预测的精度,仍需做进一步的研究和广泛的验证。

在缺口高循环疲劳强度预测研究中,一般认为临界距离是与载荷比相关的参数^[11]。而在缺口疲劳寿命预测研究中, Susmel 等人^[8]则假设临界距离与载荷比无关,虽然得到了较好的寿命预测结果。但他们仅研究了 $R=-1$ 和 $R=0$ 两种载荷比情况下的缺口试验数据,不能说明也适用于其他载荷比情况。Susmel 等人在研究中还假设临界距离与疲劳寿命和缺口尖锐程度(即应力集中程度)等因素无关。而 YANG Xiaoguang 等人^[10]对定向凝固 DZ125 合金缺口疲劳寿命的研究结果表明只有假设临界距离与疲劳寿命和应力集中系数相关才能得到较好的寿命预测结果。YANG Xiaoguang 等人仅研究了载荷比 $R=0.1$ 的情况,也没有探讨临界距离与载荷比的相关性。

可见采用临界距离理论预测缺口疲劳寿命的方法还不成熟,还需要进一步研究和验证。为此本文基于国产 TC4 合金的光滑和缺口疲劳试验数据,对应用临界距离理论预测缺口疲劳寿命时,临界距离与疲劳寿命、载荷比以及应力集中系数的相关性进行了研究和探讨。

1 临界距离理论

临界距离理论有“点法”、“线法”、“面法”等。这里以“点法”和“线法”为例简要介绍一下临界距离理论的基本原理。

“点法”是以缺口根部截面上某一点的应力或应变作为有效应力或应变进行寿命预测。假设采用应变进行寿命分析,那么对于如图 1 所示的缺口试样,“点法”采用的有效应变为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_a(r = L_{\text{pm}}, \theta = 0) \quad (1)$$

其中 L_{pm} 为“点法”的临界距离。“线法”是指以缺口根部截面一定距离内的平均应力或应变作为有

效应力或应变进行寿命预测. 基于应变进行寿命预测时,“线法”的有效应变计算公式为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{L_{\text{lm}}} \int_0^{L_{\text{lm}}} \epsilon_a(r, \theta = 0) dr \quad (2)$$

其中 L_{lm} 为“线法”的临界距离.

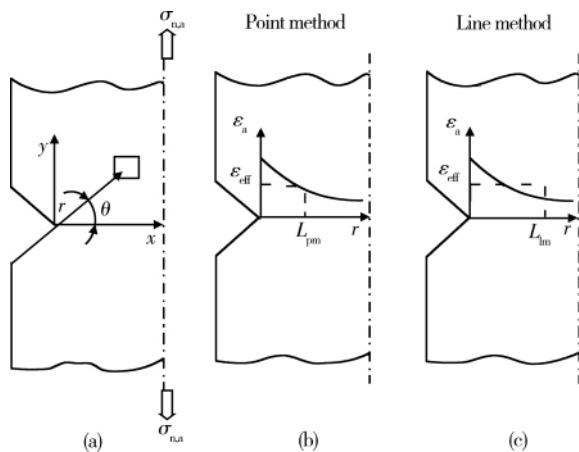


图1 临界距离理论示意图

Fig. 1 Schematic illustration for the theory of critical distance

采用临界距离理论预测缺口疲劳寿命与传统局部应力应变法的过程基本一致. 主要不同点是临界距离理论需要根据光滑和缺口疲劳试验数据确定缺口的临界距离, 进而根据缺口件的应力应变分析结果计算临界距离上的有效应变(或有效应力). 本文主要采用“线法”对 TC4 合金缺口疲劳试验数据进行分析.

2 TC4 合金光滑试样的疲劳寿命模型

为预测缺口试样的疲劳寿命, 首先需要建立光滑试样的疲劳寿命模型. 本文采用 Walker 等效应变参数来建立 TC4 合金光滑试样的疲劳寿命模型.

Walker 等效应变的定义如下^[12]:

$$\epsilon_w = \left(\frac{\sigma_{\text{max}}}{E} \right) \left(\frac{\Delta \epsilon E}{\sigma_{\text{max}}} \right)^w \quad (3)$$

其中 σ_{max} 为疲劳循环的最大应力, $\Delta \epsilon$ 为循环应变范围, E 为材料的弹性模量, w 为材料参数. Walker 等效应变计算公式中包含最大应力项, 采用该等效应变建立的疲劳寿命模型可以考虑平均应力效应.

Jaske 等人^[13]采用 Walker 等效应变和反双曲正切函数来拟合材料的疲劳试验数据, 结果表明 Walker 等效应变模型可适用于 $10 \sim 10^8$ 次循

环的较大寿命范围, 但所需实验数据较多, 曲线的拟合也比较复杂. 王卫国^[14]的研究表明在 $10^3 \sim 10^5$ 疲劳寿命范围内, Walker 等效应变-寿命关系在双对数坐标系中具有较好的线性相关性, 建立了如下较简单的 Walker 等效应变寿命模型:

$$\epsilon_w = u(N_f)^v \quad (4)$$

其中 u 和 v 为拟合参数. 航空发动机设计用材料数据手册^[15]中提供的 TC4 合金光滑试样应力疲劳试验数据主要分布在 $10^3 \sim 10^5$ 范围. 因此可采用上述公式(4)建立其 Walker 等效应变寿命模型.

文献^[15]提供了 TC4 合金光滑试样在不同载荷比时的应力疲劳试验数据. 为建立其 Walker 等效应变寿命模型, 本文采用 Ramberg-Osgood 稳态循环应力应变曲线公式将 TC4 合金应力疲劳试验的循环应力范围转变为各循环应力水平下的稳定循环应变范围

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

其中 K 和 n 为材料参数, 其数值取自文献^[15]. 最终本文建立的 TC4 合金光滑试样疲劳寿命模型为

$$\epsilon_w = 0.0318 N_f^{-0.1638} \quad (6)$$

试验数据与上式拟合结果的对比如图 2 所示. 从图中可以看出, 该模型能够较好地描述文献^[15]中 TC4 合金不同载荷比下的应力疲劳试验数据.

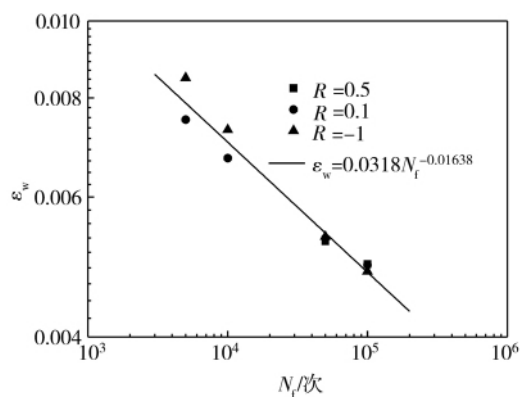


图2 Walker 等效应变-寿命曲线

Fig. 2 Walker equivalent strain-life curve

3 TC4 合金缺口试样临界距离分析和疲劳寿命预测

采用临界距离理论预测缺口疲劳寿命, 首先需要确定缺口的临界距离. 本文采用 Susmel, YANG Xiaoguang 等人采用的方法, 由材料的光滑疲劳寿命模型(或疲劳曲线)和缺口疲劳试验数

据来确定缺口试样的临界距离,在此基础上研究缺口临界距离与疲劳寿命、载荷比和应力集中系数的相关性.临界距离计算公式为

$$\epsilon_{w,eff}^y = \frac{1}{L_{lm}} \int_0^{L_{lm}} \epsilon_w^y(r, \theta = 0) dr = u(N_f)^y \quad (7)$$

其中 $\epsilon_w^y(r, \theta = 0)$ 为缺口试样根部截面的 Walker 等效应变分布函数,这里 Walker 等效应变采用试样轴向(即图 1 所示坐标轴 y 向)的最大应力和应变范围进行计算.对于 TC4 合金缺口疲劳试验数据,疲劳寿命 N_f 已知,缺口根部的循环应力应变响应由 ANSYS 有限元软件采用 Chaboche 本构模型进行弹塑性计算获得,然后以公式(3)计算缺口根部截面的 Walker 等效应变分布 $\epsilon_w^y(r, \theta = 0)$,因此可根据公式(7)计算得到每一个缺口试样的临界距离.

反过来在临界距离已知的情况下,可根据缺口试样承受的疲劳载荷计算缺口根部截面的 Walker 等效应变分布 $\epsilon_w^y(r, \theta = 0)$,进而根据公式(7)计算缺口试样的 Walker 有效应变和疲劳寿命.

3.1 临界距离与疲劳寿命和载荷比的相关性

根据上述临界距离确定方法,首先计算了文献[15]提供的 TC4 合金 $K_t=3$ 缺口试样在不同载荷比(分别为 $R=-1, 0.1$ 和 0.5)和不同疲劳寿命时的临界距离,计算结果分别见表 1.从表 1 中可以看出,首先 TC4 合金缺口试样的临界距离明显与疲劳寿命相关,随着疲劳寿命的增大,临界距离逐渐减小,且变化较为明显;其次 TC4 合金缺口试样的临界距离明显与载荷比相关,载荷比为 $R=-1$ 和 $R=0$ 时,临界距离的差别较小,但载荷比为 $R=0.5$ 时,临界距离明显不同.

表 1 $K_t=3$ 缺口试样的临界距离 L_{lm}

Table 1 Critical distance L_{lm} of $K_t=3$ notched specimens

$N_f/10^3$ 次	L_{lm}/mm		
	$R=0.5$	$R=0.1$	$R=-1$
5	0.264	0.226	0.232
10	0.221	0.184	0.185
50	0.177	0.107	0.108
100	0.177	0.106	0.092

进一步将表 1 的临界距离计算结果表示在横坐标为疲劳寿命、纵坐标为临界距离的双对数坐

标系下,如图 3 所示.从图中可以看出,载荷比相同时,TC4 合金缺口试样的临界距离与疲劳寿命之间存在明显的线性相关关系,即临界距离与疲劳寿命之间可采用如下幂函数关系来描述:

$$L_{lm} = a(N_f)^b \quad (8)$$

其中 a, b 为拟合参数.

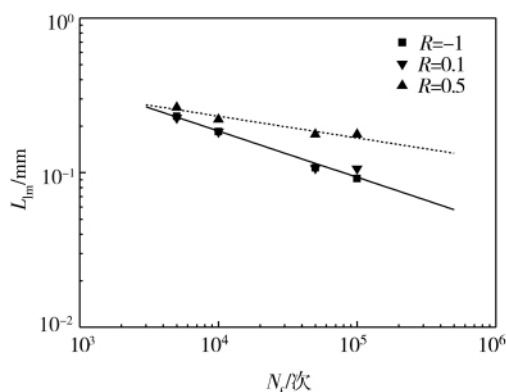


图 3 $K_t=3$ 缺口试样的临界距离-寿命拟合曲线

Fig. 3 Critical distance-fatigue life fit curve for $K_t=3$ notched specimens

从图中数据分布特点进一步可看出,载荷比 $R=-1$ 和 $R=0.1$ 时,临界距离-疲劳寿命关系可采用同一曲线来描述.而载荷比 $R=0.5$ 时,临界距离-疲劳寿命关系显然服从另外一条幂函数曲线.即载荷比对 TC4 合金缺口试样的临界距离是有明显影响的.临界距离-疲劳寿命曲线拟合结果分别为

$$L_{lm} = 2.953(N_f)^{-0.301}, \quad R = -1, 0.1 \quad (9)$$

$$L_{lm} = 0.850(N_f)^{-0.141}, \quad R = 0.5 \quad (10)$$

上述计算结果表明 TC4 合金缺口试样的临界距离不仅与疲劳寿命相关,而且与载荷比相关.在寿命预测时是否应考虑临界距离随疲劳寿命以及载荷比的变化,除了考虑方法本身是否简单之外,更重要的是要看寿命预测结果的准确性.

下面首先以对 $K_t=3$ 缺口试样在载荷比 $R=-1$ 和 $R=0.1$ 时的寿命预测为例,来考察是否要考虑临界距离与疲劳寿命的相关性.假设不考虑临界距离与疲劳寿命的相关性,而以缺口试样临界距离的平均值进行寿命预测.若考虑临界距离与疲劳寿命的相关性,则以拟合公式(9)计算的临界距离进行寿命预测.两种假设下的寿命预测结果如图 4 所示,图 4 中 N_{test} 为试验寿命, $N_{predict}$ 为预测寿命.从图 4 中可以看出,考虑临界距离与疲劳寿命的相关性时,寿命预测结果分散性很小,而

不考虑临界距离与疲劳寿命的相关性时,寿命预测结果的分散性要大得多.可见对 TC4 合金,要提高缺口疲劳寿命预测的精度,在应用临界距离理论时应当考虑临界距离与疲劳寿命的相关性.

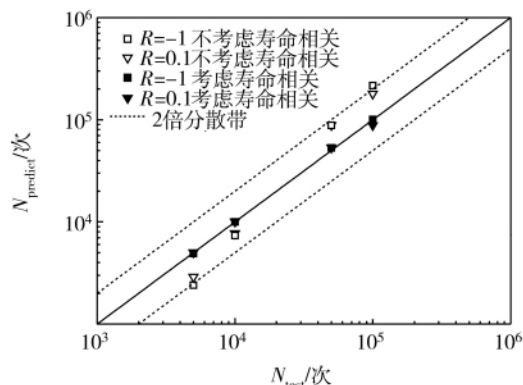


图4 临界距离与寿命的相关性对寿命预测结果的影响

Fig. 4 Influence on fatigue life prediction of considering the correlation between the critical distance and fatigue life

为考察是否要考虑临界距离随载荷比的变化,下面以 $K_t=3$ 缺口试样在 $R=-1$ 和 $R=0$ 时的临界距离拟合曲线(即公式(9))对 $R=0.5$ 时的疲劳寿命进行预测,预测结果如图5所示.从图5中同样可以看出,只有考虑临界距离与载荷比的相关性,才能得到更准确的疲劳寿命预测结果.

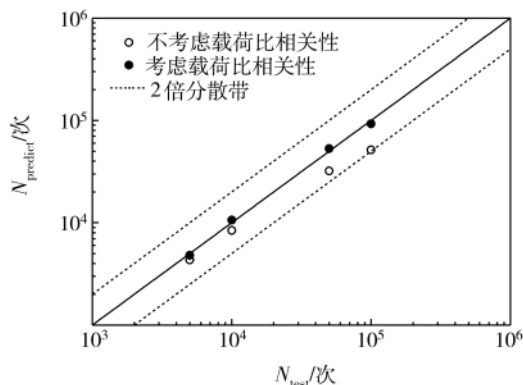


图5 载荷比相关性对寿命预测结果的影响

Fig. 5 Influence on fatigue life prediction of considering the correlation between the critical distance and load ratio

基于上面的计算分析结果,本文认为对于 TC4 合金,同一载荷比下临界距离随着寿命增加

而减小;而同一寿命下载荷比越大,临界距离越大.

3.2 临界距离与应力集中系数的相关性

根据 Susmel 等人^[8]的研究结论,采用临界距离理论预测钢、铝合金等材料缺口试样的疲劳寿命时,可以假设临界距离与缺口尖锐程度(即应力集中程度)无关.对于 TC4 合金,本文首先基于 Susmel 等人的结论,假设其缺口试样临界距离与应力集中系数无关,而采用由 $K_t=3$ 缺口试样建立的临界距离经验公式(式(9)和式(10))对 $K_t=5$ 缺口试样的疲劳寿命进行了预测.预测结果如图6所示.从图6中可以看出, $K_t=5$ 缺口试样的疲劳寿命预测结果均偏大,多数为试验寿命的2~3倍.说明以 $K_t=3$ 缺口试样得到的临界距离不能有效预测 $K_t=5$ 缺口试样的疲劳寿命,即表明 TC4 合金缺口试样的临界距离与应力集中系数相关.

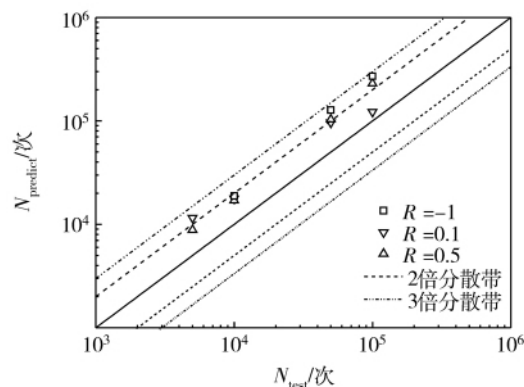


图6 基于 $K_t=3$ 缺口试样建立的临界距离经验公式对 $K_t=5$ 缺口试样的疲劳寿命预测结果

Fig. 6 Fatigue life prediction of $K_t=5$ notched specimens based on the empirical relationship of critical distance for $K_t=3$ notched specimens

因此本文首先根据前述缺口试样临界距离确定方法,计算了文献^[15]提供的 $K_t=5$, TC4 合金缺口试样在不同载荷比(分别为 $-1, 0.1$ 和 0.5)和不同疲劳寿命时的临界距离,计算结果分别见图7和图8所示,并与 $K_t=3$ 缺口试样在相应载荷比下的临界距离进行了对比.从图8中可以看出,对于 $K_t=5$ 的 TC4 合金缺口试样,同样在载荷比 $R=-1$ 和 $R=0.1$ 时,临界距离与疲劳寿命的相关关系基本一致,可采用同一幂函数公式来描述,拟合结果为

$$L_{lm} = 1.954(N_f)^{-0.306}, \quad R = -1, 0.1 \quad (11)$$

而 $R=0.5$ 时,临界距离与疲劳寿命的关系需采用另一幂函数公式来描述,拟合结果为

$$L_{\text{lm}} = 1.421(N_f)^{-0.235}, \quad R = 0.5 \quad (12)$$

显然对于 TC4 合金缺口试样,应力集中系数不同时,临界距离存在明显差别。

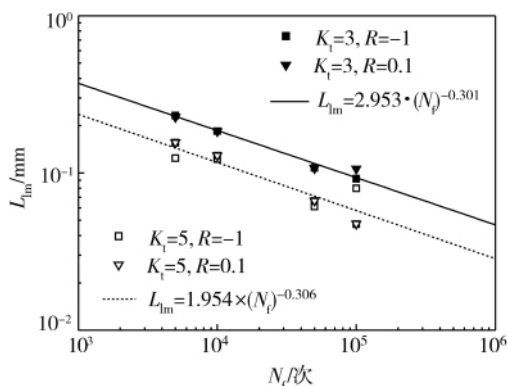


图 7 载荷比 $R=0.1, -1$ 时两种缺口试样临界距离对比

Fig. 7 Comparison of critical distance between the two kind of notched specimens for load ratio of 0.1 and -1

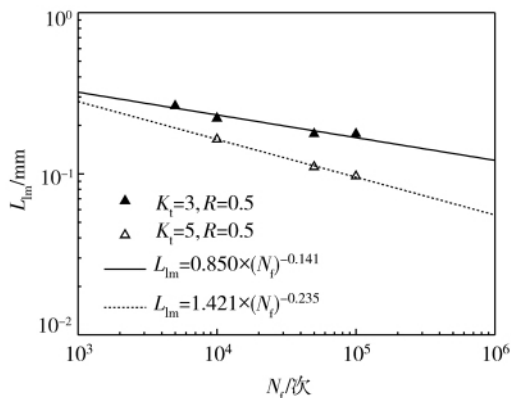


图 8 载荷比 $R=0.5$ 时两种缺口试样临界距离对比

Fig. 8 Comparison of critical distance between the two kind of notched specimens for load ratio of 0.5

为进一步研究 TC4 合金缺口试样临界距离与应力集中系数的相关关系,借鉴 YANG Xi-aoguang 等人^[10]对 DZ125 定向凝固高温合金的研究方法,将 TC4 合金两种缺口试样的临界距离计算结果重新表示在横坐标为疲劳寿命、纵坐标为 $K_t \cdot L_{\text{lm}}$ (应力集中系数与临界距离的乘积)的双对数坐标系下,分别如图 9 和图 10 所示。从图 9、图 10 中可以看出,在相同的载荷比下,两种缺

口试样的临界距离数据基本集中在一条拟合曲线上,拟合公式为

$$K_t \cdot L_{\text{lm}} = A(N_f)^B \quad (13)$$

其中 A, B 为拟合参数。载荷比 $R=-1$ 和 $R=0.1$ 时,拟合结果为

$$K_t \cdot L_{\text{lm}} = 6.709 N_f^{-0.272}, \quad R = -1, 0.1 \quad (14)$$

载荷比 $R=0.5$ 时,拟合结果为

$$K_t \cdot L_{\text{lm}} = 2.385 N_f^{-0.134}, \quad R = 0.5 \quad (15)$$

上述结果说明在相同的载荷比下,TC4 合金缺口试样的临界距离与应力集中系数的乘积和疲劳寿命之间近似存在唯一的相关关系(在双对数坐标系下为线性关系)。或者说在载荷比和疲劳寿命相同的情况下,TC4 合金缺口试样的临界距离与应力集中系数近似成反比关系。在 YANG Xi-aoguang 等人的研究中认为上述关系可能是对 DZ125 等各向异性材料才具有的关系。本文的研究表明对 TC4 合金,缺口临界距离与疲劳寿命之间同样存在类似的关系。

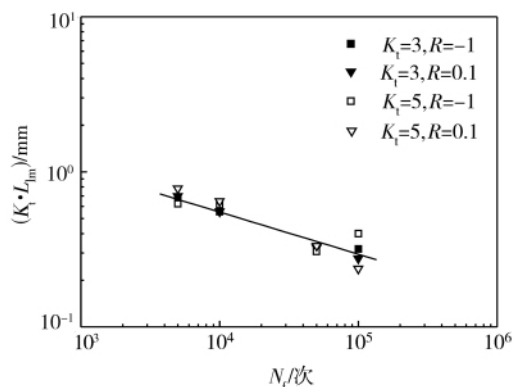


图 9 载荷比为 0.1、 -1 时的 $K_t \cdot L_{\text{lm}}-N_f$ 曲线

Fig. 9 $K_t \cdot L_{\text{lm}}-N_f$ fit curve for load ratio of 0.1 and -1

基于上述临界距离经验公式(14)和公式(15),重新对 TC4 合金 $K_t=3$ 和 $K_t=5$ 缺口试样的疲劳寿命进行预测,预测结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,所有缺口试样的疲劳寿命计算结果均在 2 倍分散带之内,与图 6 所示不考虑应力集中系数影响时的预测结果相比要好得多。说明上述临界距离经验公式对 TC4 合金 $K_t=3$ 和 $K_t=5$ 缺口疲劳试验数据具有很好的相关能力,用其来考虑临界距离与应力集中系数的相关关

系,可潜在提高 TC4 合金的缺口疲劳寿命预测精度。

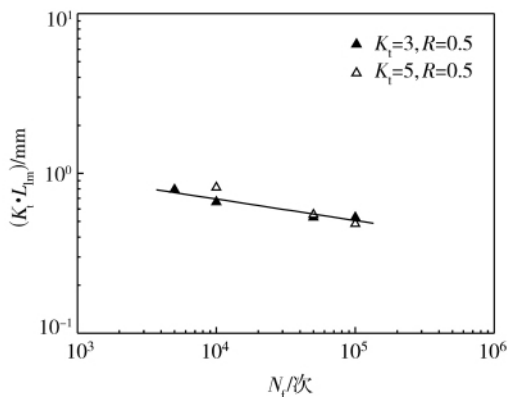


图 10 载荷比为 0.5 时的 $K_t \cdot L_m - N_f$ 曲线

Fig. 10 $K_t \cdot L_m - N_f$ fit curve for load ratio of 0.5

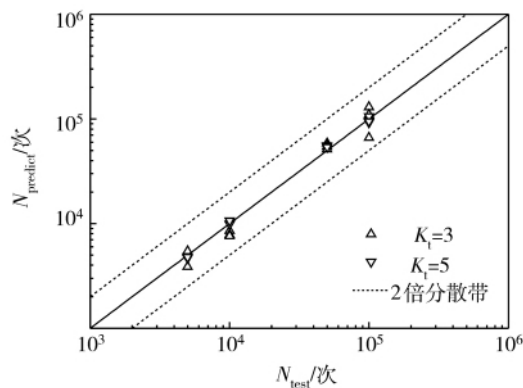


图 11 考虑应力集中系数相关性时的疲劳寿命预测结果

Fig. 11 Fatigue life prediction of $K_t=5$ notched specimens considering the correlation between critical distance and stress concentration factor

基于上面对临界距离与应力集中系数相关性的分析和讨论,本文认为对 TC4 合金而言,其临界距离与应力集中系数存在如式(13)所表述的经验关系.采用这一经验关系进行的 TC4 合金缺口疲劳寿命预测精度更好,但该经验关系是否适用于其他材料,还需要进一步的验证。

4 结 论

本文采用“线法”临界距离理论对 TC4 合金缺口试样的临界距离和低循环疲劳寿命进行了分析和预测,重点研究了缺口临界距离与寿命、载荷比、应力集中系数等参数的相关关系及其对寿命预测结果的影响.主要结论如下:

1) TC4 合金缺口试样的临界距离不仅与疲劳寿命有关,还与载荷比有关.载荷比相同时,临界距离与疲劳寿命之间可采用幂函数经验公式来描述.载荷比 $R=-1$ 和 0.1 时,TC4 合金缺口试样的临界距离—疲劳寿命曲线基本重合,当载荷比增大为 $R=0.5$ 时,临界距离明显增大。

2) TC4 合金缺口试样的临界距离与应力集中系数相关,载荷比和疲劳寿命相同时,临界距离与应力集中系数近似成反比关系。

3) 如何更有效地综合考虑应力集中系数和载荷比对临界距离的影响,而不是分别处理,还有待作进一步的研究。

参考文献:

- [1] Neuber H. Theory of notch stresses; principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material[M]. 2nd ed. Berlin; Springer-Verlag, 1958.
- [2] Peterson R E. Notch sensitivity[M]. Metal Fatigue, New York; McGraw Hill, 1959; 293-306.
- [3] Taylor D. The theory of critical distances; a new perspective in fracture mechanics[M]. Oxford; Elsevier, 2007.
- [4] Taylor D. Geometrical effects in fatigue; a unifying theoretical model[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(5): 413-420.
- [5] Susmel L. The theory of critical distances; a review of its applications in fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(7): 1706-1724.
- [6] Taylor D, Bologna P, Knani K B. Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(9): 735-742.
- [7] Susmel L, Taylor D. A novel formulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notched components in the medium-cycle fatigue regime[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2007, 30(7): 567-581.
- [8] 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(8 pages).
- [9] 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.
- [10] YANG Xiaoguang, WANG Jingke, LIU Jinlong. High temperature LCF life prediction of notched DS Ni-based superalloy using critical distance concept[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(11): 1470-1476.
- [11] Lanning D B, Nicholas T, Haritos G K. On the use of critical distance theories for the prediction of the high cycle fa-

- tigue limit stress in notched Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(1): 45-57.
- [12] Walker K. The effects of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum; effect of environment and complex load history on fatigue life [R]. West Conshohocken: American Society Testing and Materials, STP 462, 1970.
- [13] Jaske C E, Feddersen C E, Davis K B, et al. Analysis of fatigue, fatigue crack propagation, and fracture data [R]. NASA-CR-132332, 1973.
- [14] 王卫国. 轮盘低循环疲劳寿命预测模型和试验评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
WANG Weiguo. Research on prediction model for disk LCF life and experiment assessment methodology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [15] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册 (第一册) [M]. 北京: 中国航空发动机总公司, 1990.