

定向凝固镍基高温合金缺口低循环疲劳性能及寿命预测

杨晓光^{1,*}, 黄佳¹, 王井科², 胡晓安¹, 石多奇¹

1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191
2. 中国人民解放军 95899 部队, 北京 100097

摘要: 针对定向凝固(DS)镍基高温合金 DZ125 开展了 850 °C 条件下不同缺口形式和不同理论应力集中系数(K_t)下的低循环疲劳(LCF)试验研究。利用弹塑性有限元分析缺口根部的应力应变场,并将传统临界距离理论(TCD)及其 K_t 修正形式引入 SWT 参数,以此开展缺口试件 LCF 寿命预测研究。结果表明:高温 LCF 强度同缺口几何形状关联不大,但具有强的 K_t 相关性;无论是将尖锐缺口试件作为校准试件还是对临界距离进行平均处理,传统 TCD 的点方法(PM)及线方法(LM)其寿命预测大于 5 倍分散带,且预测能力同缺口应力集中程度相关;改进 TCD 的点方法和线方法可得到小于 2 倍的分散带,且其预测精度与缺口几何形状无关。由于 SWT 参数可考虑平均应力(应力比)影响,故根据光滑试件和某 K_t 下缺口 LCF 试验数据便可以采用改进 TCD 预测其他缺口试件在不同应力比下的疲劳寿命,其应用简单、方便。

关键词: 低循环疲劳; 临界距离理论; SWT 参数; Manson-Coffin 方法; 定向凝固镍基高温合金

中图分类号: V231.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)07-1596-09

现代航空工业的发展,导致对发动机结构重量和冷却性能等的要求越来越苛刻,具体表现为发动机涡轮叶片、压气机叶片等零部件结构越来越复杂,几何上本身存在很多不连续。比如:涡轮叶片上的冷却小孔、叶片内部复杂的气流通道、叶身与榫头的弧形过渡等;同时,材料内部本身工艺缺陷,例如夹杂、铸造缺陷、加工划痕等也会造成几何不连续;此外,发动机使用过程中,外物的吸入,会在发动机叶片上造成压痕、划痕、缺口等。上述几何不连续处在载荷作用下将产生应力集中,对构件的疲劳有显著的影响^[1-2]。而应力集中下寿命预测模型是否简单有效,将直接影响到复杂结构件疲劳寿命的预测精度和效率。针对应力集中影响下的单轴疲劳寿命问题,目前广泛发展

的预测方法中:局部应变法以缺口根部(或危险点处)的应变范围结合光滑试件的疲劳寿命曲线估计构件寿命,具代表性的两种常用形式是 Manson-Coffin 公式^[3-4]与 Morrow^[5]和 SWT^[6]平均应力修正公式;非局部方法中,Yao 等^[7]提出的应力场强参数 $\Delta\sigma_{FI}$,在预测缺口构件低循环疲劳(LCF)寿命时可以直接建立其与寿命的关系。Bentachfine 等^[8]引入临界疲劳损伤区的概念,提出了一种基于平均应变能密度的缺口 LCF 寿命预测方法。而临界距离理论(TCD)则是将寿命预测的经验方法同线弹性断裂力学方法联系起来,其实施简单和效率高的特点使得该方法近几十年来得到了长足的发展。该方法由 Neuber^[9]和 Peterson^[10]首先提出,随后 Taylor^[11]对临界

收稿日期: 2012-09-03; 退修日期: 2012-11-21; 录用日期: 2012-12-25; 网络出版时间: 2013-01-09 10:23
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130109.1023.004.html

* 通讯作者. Tel.: 010-82339071 E-mail: yxg@buaa.edu.cn

引用格式: Yang X G, Huang J, Wang J K, et al. Properties and life prediction of low cycle fatigue behavior on notched DS Ni-based superalloy. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2013, 34(7): 1596-1604. 杨晓光, 黄佳, 王井科, 等. 定向凝固镍基高温合金缺口低循环疲劳性能及寿命预测. 航空学报, 2013, 34(7): 1596-1604.

距离思想进行再研究而提出了广泛用于疲劳极限强度预测的方程。而 Susmel 和 Taylor^[12-13] 基于临界距离取决于失效寿命的假设,并结合 Manson-Coffin 公式以及 SWT 公式,使该方法能扩展运用于 LCF 寿命预测。同时,基于 TCD 还可成功预测多轴疲劳加载下缺口构件的 LCF 寿命^[14]。总之,基于 TCD 的寿命预测方法,概念明确且实施简单,其适用范围已经扩展到全寿命范围的预测。本文通过 3 种缺口形式(U 型、V 型和 C 型)的 DZ125 平板试件,开展了 850 °C 下考虑应力集中和缺口几何形状影响的 LCF 试验研究。此外,基于 TCD 开展寿命建模工作,并讨论传统 TCD 及其理论应力集中系数(K_t)修正形式的寿命预测能力。

1 材料和试验过程

试验用的 DZ125 合金铸坯母材来自西安航空发动机公司,采用真空感应炉,浇铸成直径为 70~90 mm 的圆形试棒,并保证晶粒的生长方向与试棒的轴向(L 方向)平行。在研究冷却孔、气流通道、外物损伤及材料夹杂缺陷等所导致的几何不连续对材料疲劳寿命的影响时,通常设计具有不同尺寸和几何的孔和缺口试件进行试验。为了比较全面地探究 TCD 在多种缺口几何、宽应力集中范围下的 LCF 寿命预测问题中的适应性,在完成 U 型和 V 型、两种应力集中系数的 LCF 试验的基础上,又补充设计了小 K_t 的 C 型缺口试件。如图 1 所示,总共有 3 种缺口几何形状且每种缺口设计两种 K_t 值(C_b 、 C_s 、 U_b 、 U_s 、 V_b 和 V_s),平板宽 b 为 6.0 mm,厚 t 为 1.5 mm, d 为缺口深度, ρ 为缺口半径, α_0 为 V 型缺口的张开角,试件拉伸方向为 DZ125 的定向凝固方向。尺寸设计时,保证 U_b 和 V_b 试件具有相近的 K_t , U_s 和 V_s 试件亦然。文中 K_t 定义为缺口试件最大轴向应力 σ_{33} 与试件净截面名义应力 σ_{net} 之比,具体通过三维弹性有限元分析得到,且应力分布沿厚度的中间截面的缺口平分线。6 种缺口试件的实测平均尺寸、 K_t 及试件数如表 1 所示。

试验过程参照标准 GB/T 15248—1994^[15] 和 HB 5287—1996^[16] 在岛津试验机上进行,试验环境为实验室静态空气介质。试验采用电热炉加热,温度控制精度为 ± 2 °C,应力控制的三角波加载,加载方向沿试件轴向,即定向凝固方向。名义

载荷比 $R = 0.1$,温度选取为 DZ125 材料的典型工作温度 850 °C。

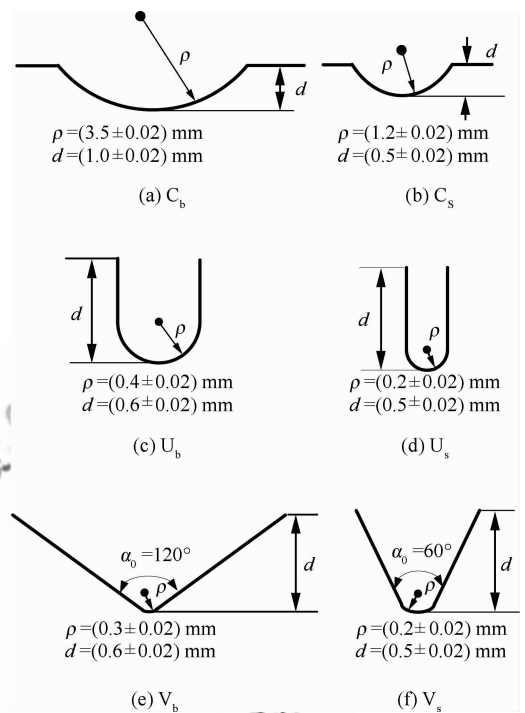


图 1 平板缺口几何形状及尺寸

Fig. 1 Geometry shape and dimension of plate specimens

表 1 缺口试件的实测平均尺寸、理论应力集中系数和试验测试根数

Table 1 Average dimension, theoretical stress concentration factor and numbers of notched specimens

Shape	Depth of notch/mm	Radius/mm	Thickness/mm	Width/mm	K_t	Number
C _b	0.98	3.57	1.27	5.90	1.80	2
C _s	0.51	1.23	1.38	5.98	1.92	2
U _b	0.60	0.40	1.43	5.96	3.01	8
U _s	0.53	0.18	1.45	5.94	4.35	4
V _b	0.60	0.30	1.44	5.94	3.01	7
V _s	0.55	0.20	1.43	5.98	4.27	3

2 试验结果及应力应变分析

6 种试件的不同净截面应力 σ_{net} 与失效寿命 N_f 的关系如图 2 所示,由此发现 K_t 值为 4.3 左右的“尖锐”试件 U_s 和 V_s 的失效寿命明显低于 K_t 值为 3.0 的 U_b 和 V_b 试件,而小 K_t 的“钝”试

件 C_b 和 C_s 的失效寿命优于前面两者。同时, K_t 值越大, 疲劳寿命的下降幅度越明显, 当 K_t 从 1.85 变化至 3.00, 疲劳寿命大致下降 2 倍, 而 K_t 从 3.00 增加至 4.30 时, 疲劳寿命下降量增至 4 倍。此外, 可以发现几何形状不一致但 K_t 相近的试件 U_b 和 V_b 、试件 U_s 和 V_s , 其疲劳寿命差别不大, 故 DZ125 缺口构件的 LCF 寿命具有强的 K_t 相关性和弱的缺口几何相关性, 换言之, K_t 对疲劳寿命的影响远大于缺口几何类型所产生的影响。注: C_b 、 C_s 和 V_s 这 3 种缺口均只进行了两种名义应力下的疲劳试验, 故不参与寿命曲线的拟合。

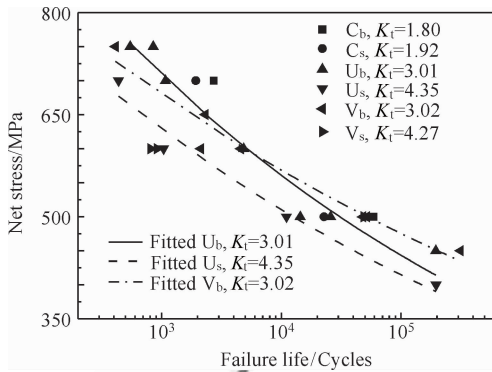


图 2 不同缺口净截面与失效寿命的关系

Fig. 2 Relationship between net stress and failure life

利用 ABAQUS 软件中基于增量的弹塑性本构理论及 Hill 屈服准则, 可获得各向异性的 DZ125 试件缺口根部的弹塑性应力/应变场, 以用于分析应力应变分布特征及寿命预测。具体实施方法是: 采用三维二十节点六面体应力单元 C3D20R 对缺口试件进行建模, 最小单元尺寸为 0.005 mm, 选取各向同性硬化准则, 且利用 DZ125 的 L 方向的稳态循环应力-应变曲线计算材料稳态循环应力-应变响应, 且考虑材料弹性卸载行为。如表 1 所示, 进行试验的 6 种缺口试件总数为 26 根, 因此根据试验加载条件对所有缺口试件进行了考虑各向异性的弹塑性应力/应变场模拟, 计算结果表明, 应力应变分布具有以下特征: ① U_b 试件最大净截面应力为 600 MPa 且 $R=0.1$ 时, U_b 试件中间截面上沿缺口平分线的轴向最大、最小弹塑性应力 σ_{33} 和应变 ϵ_{33} 的分布如图 3 所示, 由此可发现, 循环加载到最大应力时

其缺口平分线上的最大拉应力出现的位置不在缺口表面而是存在一定偏移, 而弹性卸载到最小应力时由于试件缺口根部的弹塑性变形协调则导致出现了一定范围的受压区域; ② 所有 6 种缺口试件在最大净截面应力 (600 MPa) 下的轴向弹塑性应力分布如图 4 所示, 容易发现, 缺口试件 U_b 和 V_b 沿缺口平分线轴向弹塑性应力分布接近, U_s 和 V_s 同样具有类似的弹塑性应力分布, 但不同 K_t 下的应力分布差别较大。此外, 循环加载到最大应力时, U 型和 V 型缺口试件的最大拉应力出现的位置偏离缺口表面, 而 C 型缺口试件的最大轴向应力出现的位置则位于缺口表面; ③ 图 5 为 C_b 缺口试件的弹塑性应力分布图, 由此可以发现,

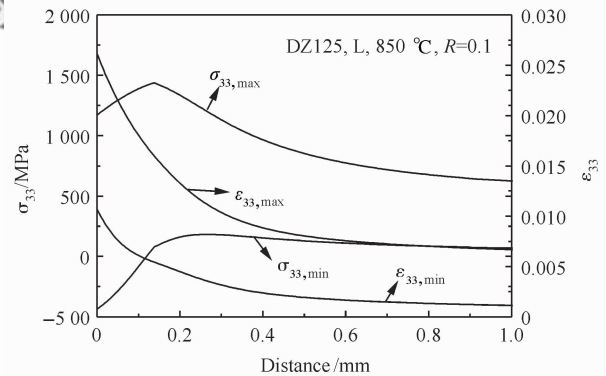


图 3 U_b 缺口试件轴向弹塑性应力和应变分布

Fig. 3 Axial elastic-plastic stress and strain distribution of U_b notched specimens

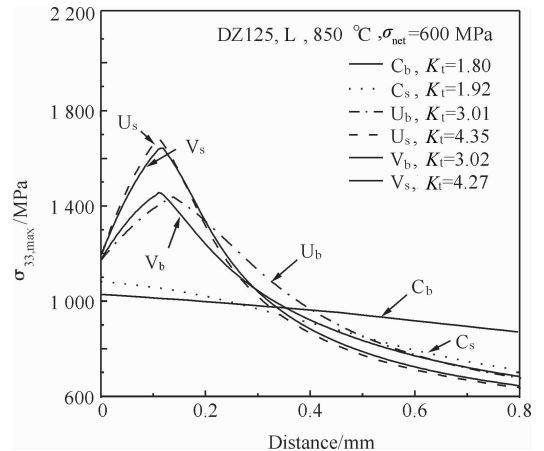


图 4 缺口试件轴向弹塑性应力分布

Fig. 4 Axial elastic-plastic stress distribution of notched specimens

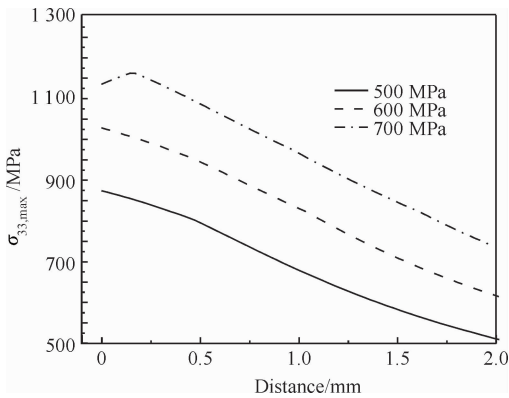


图5 C_b型缺口试件轴向弹塑性应力分布

Fig. 5 Axial elastic-plastic stress distribution of C_b notched specimens

σ_{net} 为 500 MPa 和 600 MPa 时,最大轴向应力值出现在缺口表面,而 σ_{net} 增加至 700 MPa 时,最大轴向应力出现的位置偏离缺口表面。

3 缺口 LCF 寿命预测

3.1 传统 TCD 用于 LCF 寿命预测

TCD 作为一种经验方法,其基本假设是只有考虑到疲劳过程区内影响疲劳断裂的全部应力/应变场后,才能正确预测缺口构件的疲劳寿命,同时在处理高循环疲劳(HCF)和 LCF 问题时具有不同思路,具体形式有线方法(LM)和点方法(PM)。预测 HCF 的疲劳极限时,假定临界距离值是材料和应力比的函数。Susmel 和 Taylor^[12-13] 在研究 LCF 范畴中的中等循环疲劳(MCF)寿命预测时,提出临界距离 D 是失效寿命 N_f 的函数,即

$$D(N_f) = AN_f^B \quad (1)$$

式中: A 和 B 为取决于材料、应力比的常数。随后,Susmel 和 Taylor^[17] 将临界距离思想与传统 Manson-Coffin 公式^[3-4] 以及 SWT 公式^[6] 结合,从而将 TCD 推广应用到了基于弹塑性应变或基于能量的 LCF 寿命预测。其中,单轴疲劳加载且缺口根部应变比 $R_e > -1$ 时,点方法和线方法所对应的 SWT 参数求解如图 6 所示,具体方程为

$$\epsilon_a \sigma_{max}(r = D_{PM}, \theta = 0) = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (2)$$

$$\frac{1}{D_{LM}} \int_0^{D_{LM}} \epsilon_a \sigma_{max}(r, \theta = 0) dr = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; ϵ_a 为应变幅值; σ_{max} 为最大应力; r 为距离缺口尖端的位移; θ 为偏离缺口平分线的角度; σ_f' 和 ϵ_f' 为材料的疲劳强度系数; b 和 c 为疲劳强度指数,以上参数值可根据对称疲劳数据拟合得到^[18];此处临界距离 D_{PM} 和 D_{LM} 同样是失效寿命 N_f 的函数,其系数 A 和 B 确定可通过校准试件(尖锐或近似裂纹缺口试件)的疲劳数据拟合得到^[12-13, 17]。

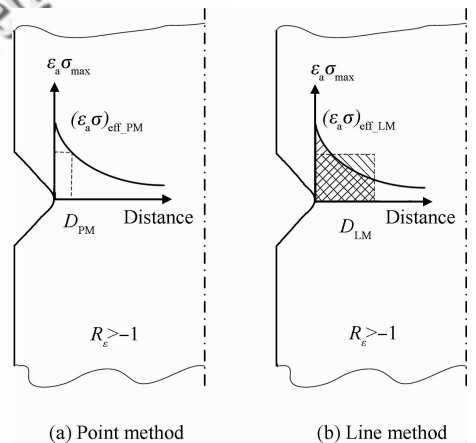


图6 SWT 参数

Fig. 6 SWT parameters

由于缺口根部应变比大于-1,故本文通过临界距离处 SWT 参数并结合 Manson-Coffin 公式开展 LCF 的寿命预测,具体思路是:①首先,根据试验结果,拟合名义应力-失效寿命关系曲线;②其次,通过弹塑性有限元分析获得各试件 σ_{net} 所对应的应力应变分布;③随后,利用式(2)和式(3)反求出给定 N_f 下,点方法和线方法所分别对应的临界距离,并通过数据拟合可得到式(1)中的系数 A 和 B ;④最后,根据图 7 所示的迭代程序计算得到预测寿命,图 7 中: $N_{f,i}$ 表示第 i 次迭代时的寿命,其初值可任意指定大小,但一般选用预估的近似初值从而减少迭代次数; D_{PM-U_s} 和 D_{LM-U_s} 表示基于 U_s 缺口数据拟合得到的点方法和线方法所对应的临界距离。其中根据临界距离和失效寿命 N_f 的不同拟合方法,可进行相应的寿命预测分析,具体如下文所述。需要注意的是,考虑到试

件 C_b 、 C_s 和 V_s 的试验点较少,故本文根据 U_b 、 U_s 和 V_b 的试验数据获得式(1),再对所有缺口类型的试件进行寿命分析。

试将平均处理后的临界距离同失效寿命相关联,具体如图 10 所示。

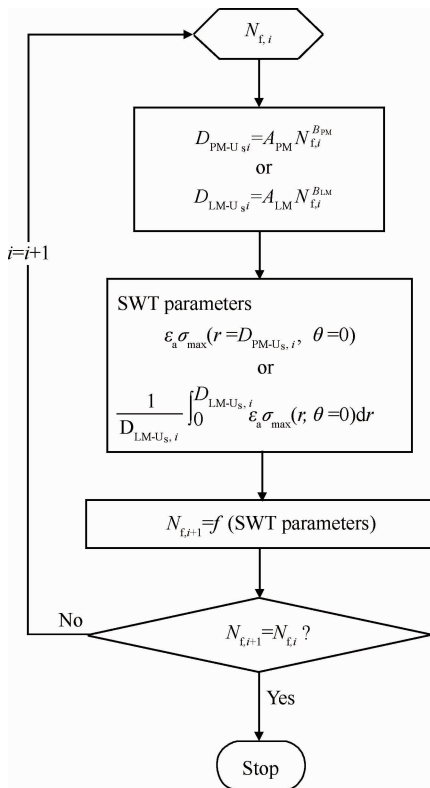


图 7 基于 TCD 预测缺口试件疲劳寿命的流程图

Fig.7 Flow chart of fatigue life prediction of notched specimen using TCD

Susmel 和 Taylor 提出应利用尖锐缺口作为校准试件^[12],因此首先选择相对尖锐的试件 U_s 作为基准,可得到式(1)中的参数 A 和 B ,具体如图 8 所示。因此,根据图 7 所示的迭代流程,可预测得到基于点方法和线方法的疲劳失效寿命,如图 9 所示。由图 9 可知,根据 Susmel 和 Taylor^[12-13]提出的利用校准试件作为基准而进行寿命预测,点方法和线方法均保守且超过 10 倍分散带。此外,除去基准试件 U_s ,该方法的预测能力同 K_t 值有关:对 K_t 值较大的试件具有较好的预测能力,但对具有较小 K_t 值的缺口试件预测能力较差。

由此可见,以尖锐试件为基准获得的预测结果极其保守,且预测结果同缺口类型相关。故尝

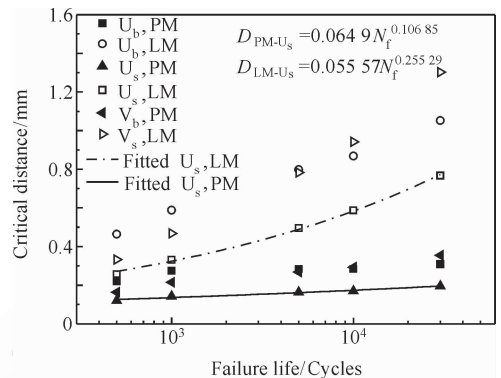
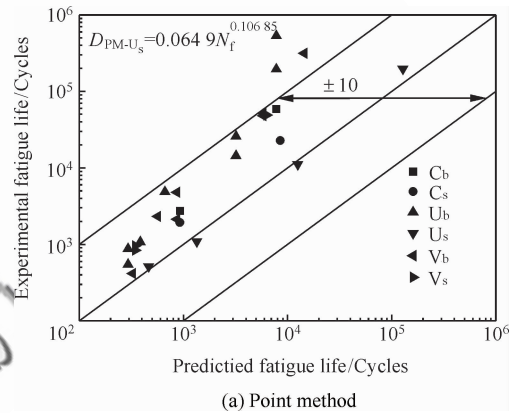
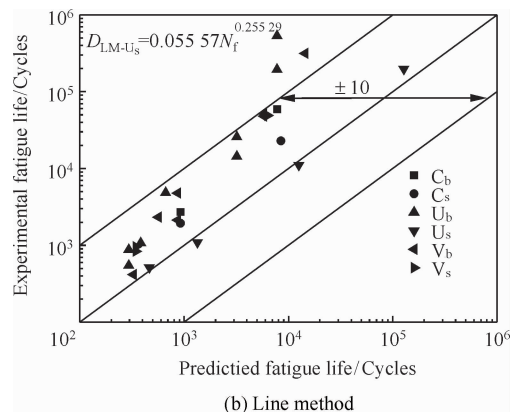


图 8 基于 U_s 试件拟合临界距离与失效寿命的关系

Fig.8 Fitted curves between critical distance and failure life based on U_s specimens



(a) Point method



(b) Line method

图 9 TCD 的点方法和线方法预测的 LCF 寿命(以 U_s 试件为基准)

Fig.9 Life prediction of LCF based on point and line methods of TCD (taking U_s specimens as calibration samples)

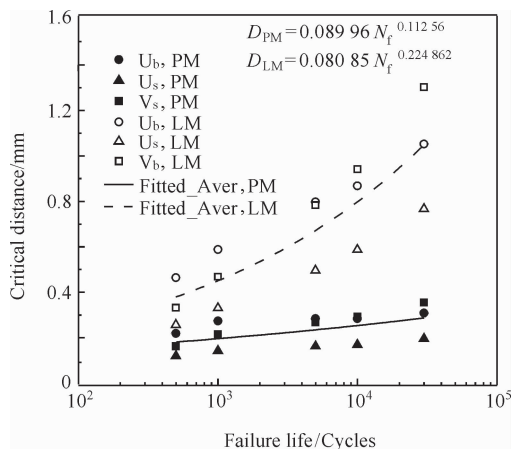
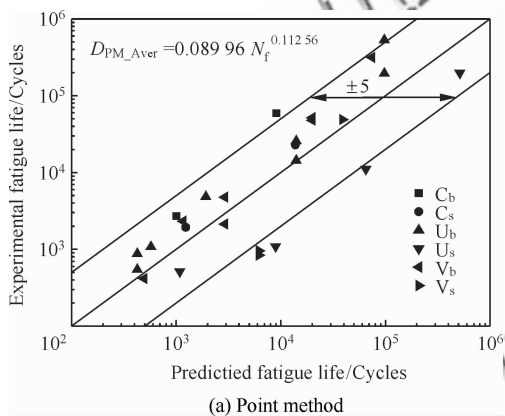
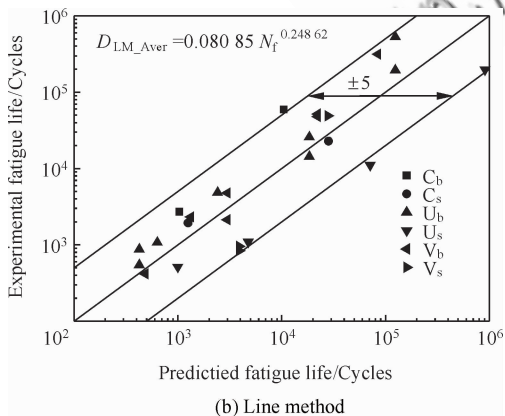


图 10 基于统计平均思路拟合临界距离与失效寿命的关系
Fig. 10 Fitted curves between critical distance and failure life based on statistical averaging method

如图 11 所示,按照图 7 所示的迭代流程可分别得到点方法和线方法寿命预测结果。显然,相对于利用 U_s 试件作为基准,基于平均思想进行



(a) Point method



(b) Line method

图 11 TCD 的点方法和线方法预测的 LCF 寿命(基于平均思想)

Fig. 11 Life prediction of LCF based on point and line methods of TCD (based on averaging method)

拟合所获得的点方法和线方法的预测精度提高至 5 倍分散带,且该方法的预测能力同 K_t 值有关:对小 K_t 试件具有较好的预测能力,而对大 K_t 试件预测能力较差。此外,该统计平均的 TCD 方法将不利于应用到实际工程中,因为其预测精度的提高依赖于大量不同缺口类型试件的试验数据,因此该方法将大大增加试验费用,况且该方法预测精度仍不满足工程需求。

3.2 K_t 修正的 TCD 用于 LCF 寿命预测

以上寿命预测分析可知,传统 TCD(无论点方法或者线方法)其缺口 LCF 寿命的预测精度均偏低,原因可能是将临界距离视为仅与失效寿命、材料和载荷比有关。而试验结果表明, K_t 是影响 DZ125 缺口疲劳寿命的重要因素,根据图 12,假定任意缺口构件的 LCF 行为,其临界距离和 K_t 的乘积是一个仅取决于失效寿命、材料和载荷比的常数^[19],从而可得到关联 K_t 的寿命方程。图 12 中的两式实际上是基于影响缺口疲劳性能的重要参数—— K_t 对传统 TCD 的一种修正,因为此时 $K_t D_{PM}$ 或者 $K_t D_{LM}$ 是仅取决于失效寿命、材料和载荷比的常数,而传统 TCD 则假定临界距离与缺口应力集中程度无关。由于不同缺口类型试件在某一指定寿命下临界距离和 K_t 的乘积几乎为一常数,因此可以根据某一种或者少数几种类型的缺口试件的试验数据拟合出式(1),为方便起见,此处根据上面分析中已经求得的 3 种类型缺口临界距离数据同失效寿命进行关联。

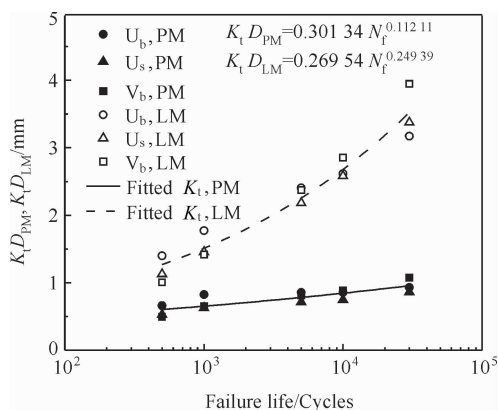


图 12 K_t 修正的临界距离与失效寿命的拟合关系

Fig. 12 Fitted curves between critical distance and failure cycles modified by K_t

再利用图 8 所示的寿命迭代流程,可得到改进 TCD 的点方法和线方法所对应的寿命预测结果,如图 13 所示。结果显示:改进的 TCD 所得到的预测精度有大幅的提高,两种方法的预测精度均为 2 倍分散带内;不同于传统 TCD 方法,改进方法由于基于 K_t 值进行了修正,故其预测能力不再具备 K_t 相关性; K_t 值相近而具有不同缺口几何形状的试件,其寿命预测结果均匀分布,因此改进 TCD 的预测能力受缺口几何形状的影响小。尤其是,改进的 TCD 在应用时可利用任意缺口试件作为基准试件,根据其试验数据拟合得到的 $K_t D$ 与 N_f 的关系便可预测其他应力集中系数下的试件寿命,有利于节省试验成本,因此改进 TCD 应用经济而简单。

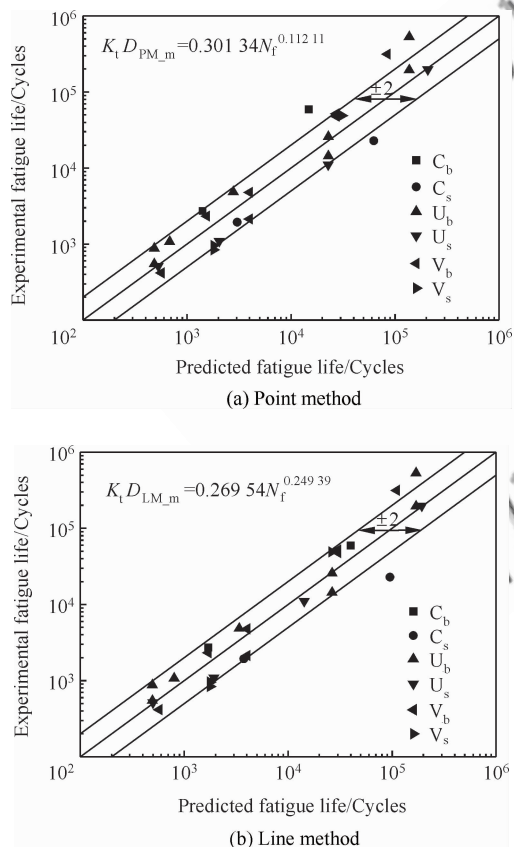


图 13 改进 TCD 的点方法和线方法预测 LCF 寿命

Fig. 13 Life prediction of LCF based on point and line methods of modified TCD

4 结论

1) DZ125 缺口构件的 LCF 寿命具有强的 K_t

相关性和弱的缺口几何形状相关性。缺口局部弹塑性应力/应变分布显示:循环加载到最大应力时,其缺口平分线上的最大拉应力出现的位置不一定在缺口表面,有可能偏离表面,具体同试件应力集中程度和加载的名义应力值相关;弹性卸载到最小应力时由于缺口根部变形协调将导致出现一定范围的受压区域。

2) 将 TCD 引入能考虑平均应力影响的 SWT 参数以开展应力集中影响下的单轴 LCF 的寿命预测,故该方法能预测非对称循环($R=0.1$)下的 LCF 寿命。而 TCD 应用差异主要体现在临界距离与 N_f 关系式不同确定方法。

3) 以 U_s 试件为校准试件确定临界距离与失效寿命的关系,所得的预测寿命几乎全是保守的,分散带大于 10 倍,且其预测能力同试件的 K_t 值有关。

4) 基于统计平均思想处理临界距离,其预测精度提高至 5 倍分散带,但其预测能力亦同试件的 K_t 值有关。此外,该方法依赖大量试验数据且预测精度仍有待提高,不利于实际工程应用。

5) 假定临界距离和 K_t 的乘积是一个仅取决于失效寿命、材料和载荷比的常数,对传统 TCD 进行修正。改进 TCD 的点方法和线方法的预测精度均在 2 倍分散带内,且其预测能力同试件 K_t 值无关。且改进 TCD 在应用时可利用任意缺口试件作为基准试件,利于节省试验成本。

参考文献

- [1] Zhou T P, Yang X G, Hou G C, et al. Experimental analysis of low-cycle and creep fatigue for directionally solidified DZ125 with a hole. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(9): 1526-1531. (in Chinese)
周天朋, 杨晓光, 侯贵仓, 等. DZ125 带小孔构件低循环/保载疲劳试验与分析. *航空动力学报*, 2007, 22(9): 1526-1531.
- [2] Zhou T P, Yang X G, Shi D Q, et al. Modeling of low-cycle and creep fatigue life for DZ125 smooth specimens and small hole components. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 276-280. (in Chinese)
周天朋, 杨晓光, 石多奇, 等. DZ125 光滑试样与小孔构件低循环/保载疲劳寿命建模. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 276-280.
- [3] Manson S S. *Behavior of materials under conditions of thermal stress*. Washington, D. C.: National Advisory

- Commission on Aeronautics, 1953.
- [4] Coffin L F, Jr. A study of the effects of cyclic thermal stress on a ductile metal. New York: Knolls Atomic Power Laboratory, 1953.
- [5] Morrow J. Fatigue design handbook—advances in engineering. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1968: 21-29.
- [6] Smith K N, Watson P, Topper T H. A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, 1970, 5(4): 767-778.
- [7] Yao W, Xia K, Gu Y. On the fatigue notch factor, K_f . *International Journal of Fatigue*, 1995, 17(4): 245-251.
- [8] Bentachfine S, Pluvinage G, Gilgert J, et al. Notch effect in low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(5): 421-430.
- [9] Neuber H. Theory of notch stresses: principles for exact stress calculation. Ann Arbor, MI: JW Edwards, 1946.
- [10] Peterson R E. Notch sensitivity. Sines G, Waisman J L. *Metal fatigue*. New York: McGraw Hill, 1959: 293-306.
- [11] Taylor D. Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(5): 413-420.
- [12] 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. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2007, 30(7): 567-581.
- [13] Susmel L, Taylor D. On the use of the theory of critical distances to estimate fatigue strength of notched components in the medium-cycle fatigue regime. *Proceedings of Fatigue*, 2006, 2006.
- [14] Susmel L, Atzori B, Meneghetti G, et al. Notch and mean stress effect in fatigue as phenomena of elasto-plastic inherent multiaxiality. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(8): 1628-1643.
- [15] GB/T 15248—1994. The test method for axial loading constant amplitude low cycle fatigue of metallic materials. Beijing: Standards Press of China, 1994: 1-17. (in Chinese)
- GB/T 15248—1994. 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法. 北京: 中国标准出版社, 1994: 1-17.
- [16] HB 5287—1996. The test method for axial loading on low cycle fatigue of metallic materials. Beijing: Standards Press of China, 1996: 1-22. (in Chinese)
- HB 5287—1996. 金属材料轴向加载疲劳试验方法. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1-22.
- [17] 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. *Journal of Engineering and Technology*, 2010, 132(2): 210021-210028.
- [18] China aeronautic material handbook (internal publication). Beijing: Institute of Aeronautical Materials, 2004: 171-213. (in Chinese)
- 中国航空材料手册(内部使用). 北京: 北京航空材料研究院, 2004: 171-213.
- [19] Yang X G, Wang J K, Liu J L. High temperature LCF life prediction of notched DS Ni-based superalloy using critical distance concept. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(11): 1470-1476.

作者简介:

杨晓光 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 镍基高温合金材料疲劳蠕变性能研究。

Tel: 010-82339071

E-mail: yxg@buaa.edu.cn

黄佳 男, 博士研究生。主要研究方向: 镍基定向凝固高温合金结构特征件的蠕变行为。

Tel: 010-82316362

E-mail: huangjia216@126.com

Properties and Life Prediction of Low Cycle Fatigue Behavior on Notched DS Ni-based Superalloy

YANG Xiaoguang^{1,*}, HUANG Jia¹, Wang Jingke², HU Xiaoan¹, SHI Duoqi¹

1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. No. 95899 Unit, The Chinese People's Liberation Army, Beijing 100097, China

Abstract: Experimental investigation is carried out in this paper on the low cycle fatigue (LCF) behavior of directionally solidified (DS) Ni-based superalloy DZ125 at 850 °C with differential notch geometries and theoretical stress concentration factors (K_t). The stress-strain field at notch roots is obtained based on the elastic-plastic finite element analysis. Life prediction of notched specimens is then performed by the introduction of conventional and K_t -modified theory of critical distance (TCD) to SWT parameters. The results show that, the resistance of LCF has little to do with the geometrical shape of notch specimens but is heavily K_t -dependent. No matter by taking sharp specimens as calibration samples or dealing with critical distances by the statistical averaging method, both point method (PM) and line method (LM) of the conventional TCD exhibit that the life prediction ability related to the stress concentration factor is larger than the five times scatter band. However, a highly improved scatter band within two times can be obtained by both point and line methods of K_t -modified TCD, and the two methods are notch-geometry independent. The SWT parameter may be used to consider the effect of mean stress (stress ratio). Therefore, accurate life prediction, based on the test data of LCF of smooth specimens and just one kind of notched specimens, can be carried out using this modified TCD for other notched specimens at different stress ratios, and its application will be simple and convenient.

Key words: low cycle fatigue; theory of critical distance; SWT parameter; Manson-Coffin method; directionally solidified nickel-based superalloy