

DOI: 10.3901/JME.2013.22.109

基于临界距离-临界平面方法预测 DZ125 缺口低循环疲劳寿命

黄佳¹ 杨晓光¹ 石多奇¹ 王井科² 胡晓安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: 考虑到镍基定向凝固合金滑移相关的塑性流动和裂纹萌生机制, 视其面心立方晶体结构中可能开动的滑移系为临界平面并以最大分切应变范围($\Delta\gamma_{\max}$)为损伤参数, 分别采用热点法和临界距离理论(Theory of critical distance, TCD)对 DZ125 的低循环疲劳寿命进行分析和预测。研究表明, 基于热点法的临界平面法其寿命预测偏保守, 且应力集中程度越大其保守程度越明显; 运用 TCD 时发现, 缺口试件的临界距离不仅同材料、失效寿命以及应力比有关, 同应力集中程度亦相关。如果以尖锐缺口试件为校准试样或采用平均思想处理临界距离, 其寿命分散带均大于 10 倍。而假定临界距离同应力集中程度相关时获得的寿命预测分散带缩小为 2 倍。

关键词: 低循环疲劳 临界距离理论 临界平面法 滑移系 定向凝固镍基高温合金

中图分类号: V231

Low Cycle Fatigue Life Prediction of Notched DZ125 Component Based on Combined Critical Distance-Critical Plane Approach

HUANG Jia¹ YANG Xiaoguang¹ SHI Duoqi¹ WANG Jingke² HU Xiaolan¹

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

2. The People's Liberation Army Military Unit 95899, Beijing 100097)

Abstract: Considering the plastic flow and crack initiation mechanism occurred on the slip systems of ni-base directionally solidified (DS) superalloy, the critical plane method with the combination of "hot point" concept and theory of critical distance(TCD) is conducted on low cycle fatigue (LCF) life prediction of notched DZ125 at 850 °C. The damage parameter on slip planes is the maximum resolved shear strain range $\Delta\gamma_{\max}$. The obtained results exhibits that the prediction ability of the "Hot point" method is conservative and K_t related. Furthermore, TCD is introduced and the analysis results show that the critical distance is not only related to material, failure cycles and stress ratio, but also related to the degree of stress concentration. Using the sharp notch as standard sample or dealing critical distance with statistics average method, the scatter band of predicted life is more than 10. However, based on the K_t modified critical distance, the scatter band is increased to 2.

Key words: Low cycle fatigue Theory of critical distance Critical plane method Slip system

Ni-base directionally solidified(DS) superalloy

0 前言

镍基定向凝固(Directionally solidified, DS)合金由于宏观上消除了横向晶界并使晶粒择优生长, 从而表现出横观各向同性特征, 同时避免了多晶材料在高温下容易出现的横向晶间断裂, 这类材料优良

的高温综合性能使得其在提高航空发动机涡轮叶片的强度和寿命方面有很大优越性, 所以其在发动机涡轮叶片等关键部件上的应用越来越广泛。而先进航空发动机性能的提升导致涡轮叶片等零部件结构越来越复杂, 具体表现为广泛存在着几何不连续特征, 比如涡轮叶片上的冷却小孔。而缺口处的应力集中和多轴应力状态将明显地影响到材料的力学性能, 比如疲劳损伤等便同应力集中程度直接相

关^[1-4]。而应力集中的存在同时将导致低循环疲劳 (Low cycle fatigue, LCF) 寿命预测变得更加复杂。

到目前为止, 缺口部件的 LCF 寿命预测有两种典型方法: 临界平面法和临界距离概念(Theory of critical distance, TCD)。临界平面法是适用于缺口多轴响应下 LCF 寿命预测的一种典型方法, 该方法认为疲劳裂纹在特定的材料平面萌生和扩展, 亦即疲劳破坏产生于疲劳损伤最大的平面, 其确定方法是通过对材料内部可能的平面进行搜索而选取损伤最大者作为临界平面^[5]。TCD 则是考虑缺口应力集中影响的一种典型方法, 该方法基于疲劳损伤过程区概念而建立, 具有实施简单和效率高的特点, 近几十年来得到了长足的发展, 其适用范围已经扩展到全寿命区域^[6-10]。到目前为止, 国内外学者基于临界平面法和 TCD, 对缺口影响下的疲劳寿命预测开展了大量研究: 张莉等^[11]通过弹塑性有限元分析得到缺口应力应变状态, 并利用临界平面法成功预测了缺口件的疲劳寿命, 但其研究对象只是各向同性材料; WAN 等^[12]将临界平面建立在滑移系上, 将分切应力范围作为损伤参数并考虑了平均应力的影响, 最终成功预测了 DD3 单晶材料的缺口疲劳寿命; YANG 等^[13]指出临界距离不仅同材料、应力比和失效寿命相关, 还同缺口尖锐度相关。并基于理论应力集中系数(K_t)修正的临界距离, 成功预测了各向异性材料的缺口 LCF 寿命, 只是没有将微观滑移变形机理及损伤萌生机制考虑在内; 而 LEIDERMARK 等^[14-15]在单晶材料的缺口 LCF 寿命预测中发现, 热点处采用的临界平面方法其结果偏保守, 而引入失效寿命相关的临界距离概念则使得其预测结果明显改善, 但没有考虑不同应力集中程度的影响, 该方法是否适应不同应力集中程度下 DS 合金的 LCF 疲劳寿命预测问题, 值得进一步研究。

镍基定向凝固高温合金 DZ125 是我国目前综合性能比较优秀的涡轮叶片材料之一, 是国产涡扇发动机高压涡轮转子叶片的主要服役材料^[16]。针对该合金国内已经开展了大量的研究工作, 主要集中在蠕变、LCF 和疲劳蠕变交互作用等方面, 但是应力集中对以上力学性能影响机制的研究并不充分, 相应的寿命建模工作也不系统, 尤其基于临界平面-临界距离概念的寿命预测方法, 国内外尚无人开展。本文基于临界距离-临界平面法开展 DS 合金 DZ125 在不同应力集中程度下的 LCF 寿命预测, 其中临界平面的搜寻范围建立在可能开动的 30 个滑移系上, 而缺口试件的临界距离值同应力集中程度相关。

1 试验和弹塑性有限元分析

具体试验材料制备过程及试验方法可参考课题组研究成果^[17-18], 试验所用试件分为光滑棒状试件和缺口平板试件, 其中 U 型缺口试件设计成两种不同的应力集中程度, 具体设计尺寸如图 1 所示(下标 b 和 s 分别表示缺口尺寸较大和较小的 U 型缺口试件)。试件拉伸方向为 DZ125 的定向凝固方向, 光滑试样和两种缺口试样的实测平均尺寸、 K_t 及试验数见表 1。理论应力集中系数 K_t 定义为缺口试样最大轴向应力与试样净截面名义应力之比, 其值可由三维弹性有限元分析得到。试验采用电热炉加温, 温度控制精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$, 加载方向沿试样轴向。光滑疲劳试验采用应变控制, 应变比为 -1; 缺口疲劳试验其名义应力比为 0.1, 加载频率为 0.5 Hz。

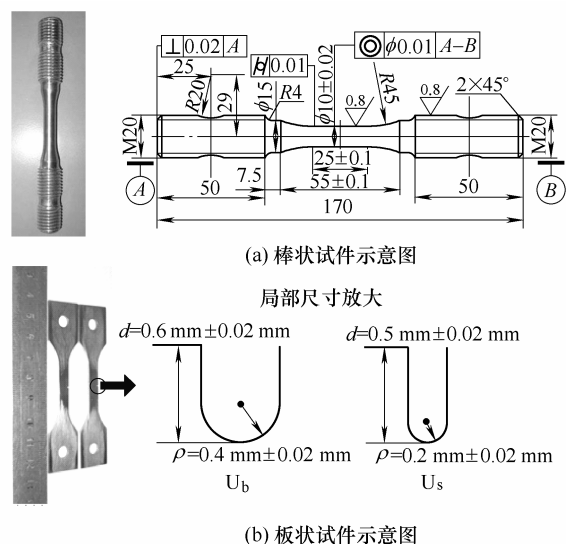


图 1 光棒及平板缺口试件形状及尺寸

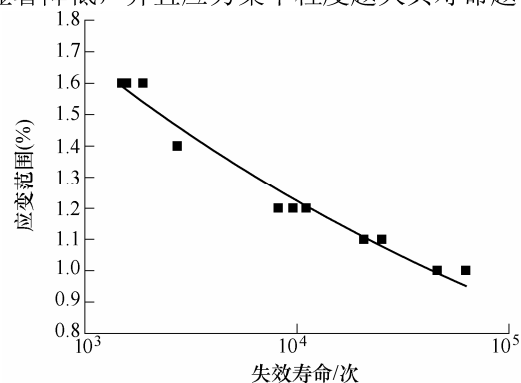
表 1 试样的尺寸、理论应力集中系数和测试数

形状	缺口深度/mm	缺口半径/mm	厚度(半径)/mm	宽度/mm	应力集中系数 K_t	数目
光棒	0	0	9.98	0	1.00	11
U_b	0.60	0.40	1.43	5.96	3.01	7
U_s	0.53	0.18	1.45	5.94	4.35	4

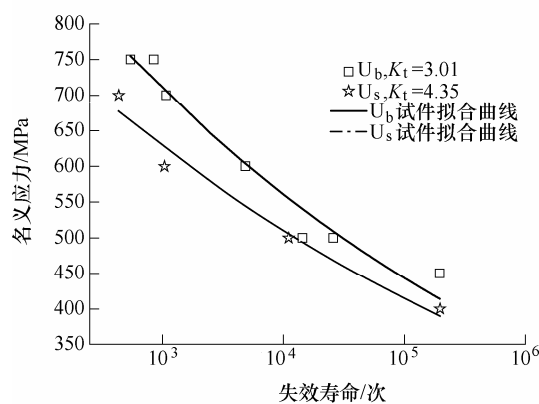
1.1 LCF 寿命试验结果

基于应变控制(应变比为 -1, 温度为 80°C)的光滑疲劳试件的 LCF 寿命见图 2a。其中, 拟合曲线方程为 $f(N)=aN^b$, 式中, a 和 b 为拟合参数, N 为疲劳寿命。缺口试样不同净截面名义应力 σ_{net} 与断裂循环数 N_f 的关系可见图 2b, 由此发现“尖锐”试样 U_s 的疲劳寿命明显低于应力集中程度较小的 U_b 试件, K_t 从 3.0 增加至 4.35 时, 疲劳寿命下降量增至 4 倍, 故 DZ125 的 LCF 寿命同应力集中程度具有强的相关性。为比较应力集中的引入对 LCF 寿

命的影响, 选取缺口试件远场端的拉伸应变范围同疲劳寿命进行关联, 具体如图 3 所示, 由此可见, 相同的远场应变范围内, 应力集中将导致其 LCF 寿命显著降低, 并且应力集中程度越大其寿命越小。



(a) 光滑试件



(b) 缺口试件

图 2 LCF 寿命曲线

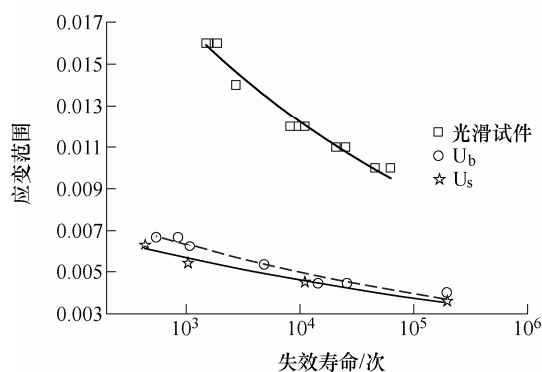


图 3 光滑和缺口试件 LCF 寿命比较

1.2 光滑和缺口试样弹塑性应力/应变分析

基于 ABAQUS 软件中基于增量的弹塑性本构理论及 Hill 屈服准则, 并利用横观各向同性材料的四阶柔度张量、屈服应力比和 Hill 参数, 可开展考虑各向异性的弹塑性应力/应变场分析, 具体的弹性常数可见表 2^[17]。采用 C3D20R 单元对光滑和缺口试样进行建模, 缺口根部最小单元尺寸为 0.005 mm, 计算时选取各向同性硬化准则, 利用 DZ125 的定向凝固方向的稳态循环应力-应变曲线来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。缺口局部稳态循环应力-应变如图 4 所示, 由此可见残余应力的存在。

表 2 DZ125 合金的材料参数

温度/°C	弹性模量/GPa	泊松比	切变模量/GPa	Hill 参数	屈服应力比
850	$E_1=E_2=117$ $E_3=91$	$\nu_{12}=0.295$ $\nu_{23}=\nu_{13}=0.595$	$G_{12}=52.5$ $G_{31}=G_{23}=89.8$	$F=G=0.5$	$R_{11}=R_{22}=0.921$
				$H=0.6784$	$R_{33}=1$
				$L=M=1.648$	$R_{12}=0.8988$
				$N=1.8568$	$R_{13}=R_{23}=0.954$

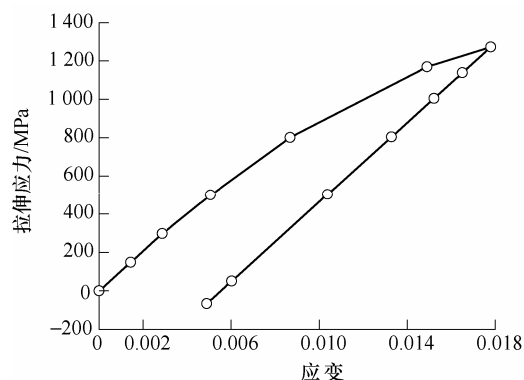
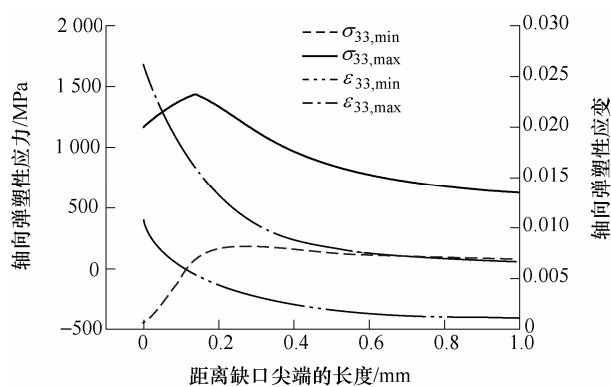


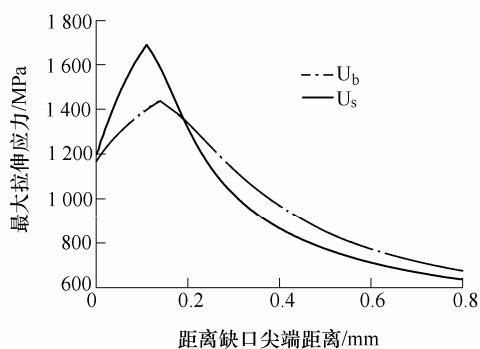
图 4 缺件尖端处稳态循环应力应变曲线

根据试验加载条件对所有光滑和缺口试件进行了考虑各向异性的弹塑性应力/应变场模拟, 缺口

试件的应力应变分布具有以下特征: U_b 试件最大净截面应力为 600 MPa、应力比为 0.1 时, 中间截面上的沿缺口平分线的轴向最大、最小弹塑性应力和应变(σ_{33} , ε_{33})分布如图 5a 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; 最大净截面应力均为 600 MPa 时, U_b 和 U_s 缺口试件其轴向弹塑性应力分布如图 5b 所示, 可见不同 K_t 下的应力分布差别较大, 且循环加载到最大应力时缺口试件的最大拉应力出现的位置偏离缺口表面。



(a) 缺口试件循环载荷中弹塑性应力应变分布



(b) 不同类型缺口试件弹塑性应力分布

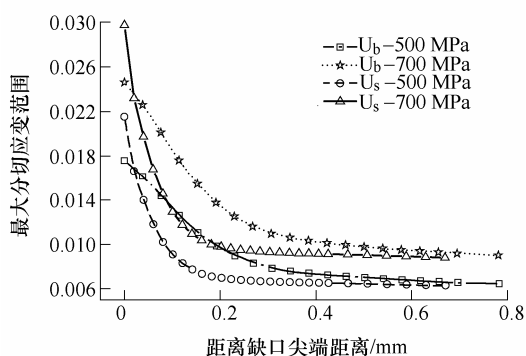
图5 缺口试件轴向弹塑性应力分布

1.3 光滑和缺口试样分切应力/应变

本文考虑到 DZ125 独特的晶体结构和滑移特征而将滑移面当成临界平面,而临界平面则通过对 DS 合金的 30 个滑移方向进行搜索而产生,滑移面和滑移方向的相关内容,以及获得滑移平面上的分切应力/应变值的方法可参见 ARAKERE 等^[19]的工作。表 3 为根据缺口平分线上最大分切应变范围 $\Delta\gamma_{\max}$ 的分布(名义应力为 500 MPa),其分布规律同 LEIDERMARK 等^[14-15]的研究结果一致。图 6 为 U_b 和 U_s 缺口在不同净截面应力加载下 $\Delta\gamma_{\max}$ 沿平分线方向的分布曲线,相同净截面应力下缺口局部的 $\Delta\gamma_{\max}$ 分布同应力集中程度明显相关,但远场处趋于一致。

表3 缺口平分线上 $\Delta\gamma_{\max}$ 分布及所在滑移系

节点 序号	U_b		节点 序号	U_s	
	滑移系	最大分切应变 范围 $\Delta\gamma_{\max}$		滑移系	最大分切应变 范围 $\Delta\gamma_{\max}$
1	15	0.017 58	1	11	0.021 50
2	24	0.016 14	2	19	0.016 64
3	24	0.014 38	3	19	0.013 98
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	24	0.006 30	26	10	0.006 35
25	24	0.006 22	27	10	0.006 31
26	19	0.006 19	28	24	0.006 27

图6 缺口平分线上 $\Delta\gamma_{\max}$ 分布

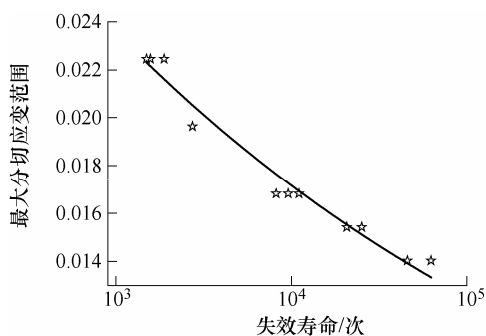
2 LCF 寿命建模

2.1 临界平面法

多轴疲劳情况下,临界平面被认为是多晶材料中最易引起破坏的平面。而临界平面的确定需要对多晶材料内部可能的平面进行搜索而选取损伤最大者作为临界平面。而对于 DS 合金,循环载荷下的疲劳损伤主要在滑移面上累积并将导致疲劳裂纹的萌生和扩展,因此一种基于物理特征的处理方法是将滑移面当成临界平面。本文以最大分切应变为疲劳损伤控制参数,相应寿命方程如式(1)所示

$$\Delta\gamma_{\max} = aN_f^b \quad (1)$$

式中, a 和 b 为寿命模型参数, N_f 为失效寿命。方程式(1)中的寿命模型参数 a 和 b 可以通过光滑试件的疲劳数据拟合得到,具体如图7所示($\Delta\gamma_{\max} = 0.061\,04N_f^{-0.137\,68}$, $R^2 = 0.968\,88$)。

图7 光滑试件 $\Delta\gamma_{\max}$ - N_f 曲线

建立在滑移系上的临界平面法,用于预测 U_b 和 U_s 缺口试件的 LCF 寿命时,将首先尝试考虑传统的热点概念,亦即选取缺口尖端处的 $\Delta\gamma_{\max}$ 并结合式(1),其寿命预测结果如图8所示,由此可明显发现,两种缺口试样其预测的寿命均偏保守,分散带大于5倍,并且发现应力集中程度越大,其预测结果越保守。

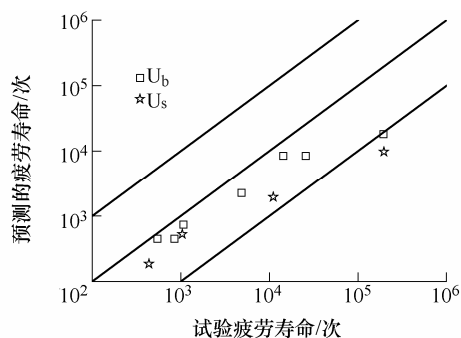


图 8 基于热点概念临界平面法预测缺口疲劳寿命

2.2 临界距离-临界平面法

由于建立在滑移系上的临界平面法, 预测 U_b 和 U_s 缺口试件的 LCF 寿命时发现, 其预测的寿命均偏保守。为了准确预测不同应力集中程度下的 LCF 寿命, 将临界距离概念引入临界平面法。然而, 临界距离不是常数, 其同材料、应力比和应力集中程度等有关, 根据临界距离不同的处理思路, TCD 具体可分为点方法和线方法。本文将 TCD 点方法同临界平面方法结合, 以临界距离点为修正的“危险点”, 随后搜寻该点处的 30 个滑移平面而确定临界平面和相应的损伤参数 $\Delta\gamma_{\max}$, 以此预测缺口试件的 LCF 寿命。各个缺口试件临界距离计算方法如下: 根据式(1)和缺口试件的疲劳寿命可反推出相应的 $\Delta\gamma_{\max}$ 值, 随后根据图 6 所示的沿缺口平分线的分布规律得到相应的临界距离值, 其分布如图 9 所示。显然, DZ125 缺口试件的临界距离不仅同失效寿命相关, 也同 K_t 相关。为获得临界距离, 本文尝试了三种不同的处理思路。

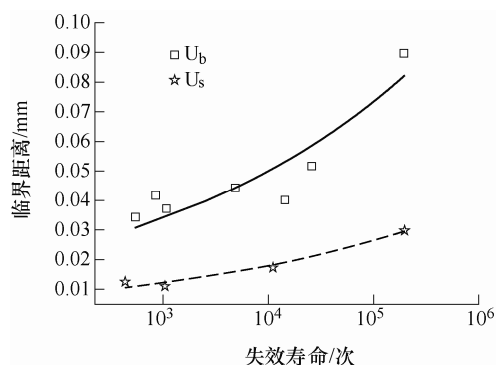


图 9 临界距离同失效寿命关系

SUSMEL 等^[9-10]研究中等循环疲劳寿命预测时, 提出临界距离 $D(N_f)$ 是疲劳失效循环数 N_f 的函数, 即

$$D(N_f) = AN_f^B \quad (2)$$

式中, A 和 B 是取决于材料、应力比和失效寿命的常数。关于系数 A 和 B 的确定, SUSMEL 等^[10]曾提出应利用尖锐缺口作为校准试样, 故首先以相对

尖锐的试样 U_s 作为基准, 可得到式(2)中的参数: $A=0.003\ 86$; $B=0.166\ 26$ 。于是, 根据式(1)、(2)和缺口平分线上 $\Delta\gamma_{\max}$ 值的分布规律, 预测寿命结果如图 10 所示, 由此可见, 其预测结果偏保守且达到 100 倍分散带。

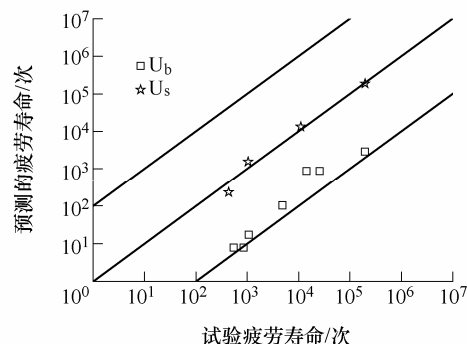


图 10 临界距离-临界平面法预测 LCF 寿命

由于以尖锐试件作为校准而获得的预测结果极其保守, 因此尝试将平均处理后的临界距离同失效寿命相关联, 同样得到式(2)中的参数 A 和 B , $A=0.010\ 27$; $B=0.143\ 43$ 。同样的寿命预测思路, 其结果如图 11 所示。显然, 相对于利用 U_s 试样作为基准, 基于平均思想进行拟合所获得预测精度提高至 10 倍分散带, 且该方法的预测 U_b 缺口试件结果较好。但是, 基于平均思路的 TCD 方法将不适用于实际工程应用中, 因其依赖于大量不同缺口类型试件的试验数据, 故将大大增加试验费用, 尤其是该方法预测精度仍不满足工程需求。

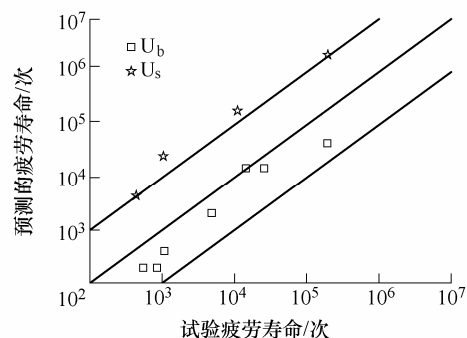


图 11 临界距离-临界平面法预测 LCF 寿命

基于以上临界距离的处理思想, 明显可见 LCF 寿命的预测精度均偏低, 其原因可能是将临界距离视为仅同失效寿命、材料和载荷比有关。尤其是 YANG 等^[13]运用 TCD 预测不同缺口几何形状和应力集中程度下的 LCF 寿命时发现, 临界距离同缺口尖锐度(应力集中程度)亦相关, 并提出了一种 K_t 修正的 TCD 计算方法 $K_t D_{PM} = aN_f^b$, 式中, D_{PM} 是采用

点方法的临界距离。同时考虑到图 9 中所得到的相应的临界距离分布, 本文将继续沿用这一思想: 运用基于临界平面-临界距离概念进行应力集中影响下的 LCF 寿命预测, 认为临界距离同 K_t 相关, 并对原方程进行了相应修改, 具体如式(3)所示

$$K_t^m D_{PM} = a N_f^b \quad (3)$$

结合图 12 中的拟合得到的临界距离计算公式 ($K_t^{2.79127} \times D_{PM} = 0.23335 N_f^{0.16673}$), 并按照前面所述寿命预测流程, 所得预测寿命如图 13 所示, 可见考虑应力集中的 TCD 所得到的预测精度有大幅提高, 精度提高至 2 倍分散带内, 且其预测能力同应力集中程度无关, 预测结果分布均匀。

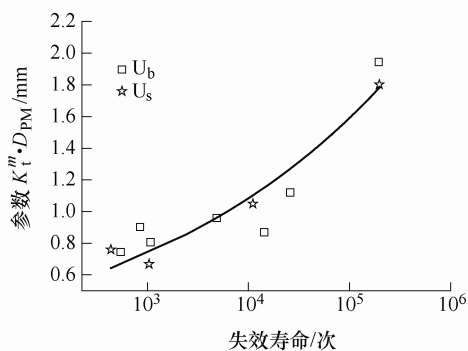


图 12 K_t 修正临界距离同失效寿命关系

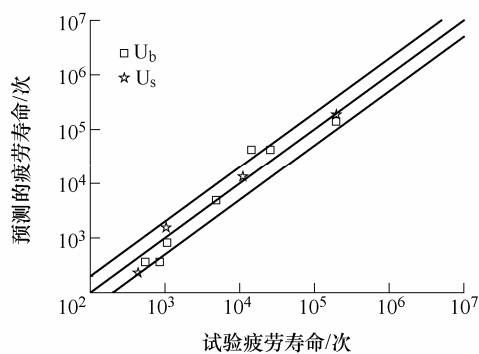


图 13 临界距离-临界平面法预测 LCF 寿命

3 结论

(1) 同光滑试样 LCF 寿命相比, 应力集中的引入将导致其 LCF 寿命显著降低。缺口试件弹塑性应力/应变分布显示, 稳定循环状态下加载到最大应力时, 其缺口平分线上的最大拉应力出现的位置不在缺口表面, 而是偏离表面; 弹性卸载到最小应力时由于试件缺口根部局部区域的变形协调会导致出现一定范围的受压区域。

(2) 沿缺口平分线方向, 不同节点处 $\Delta\gamma_{\max}$ 值所

在滑移系并不一致, 相同净截面应力下缺口局部的 $\Delta\gamma_{\max}$ 分布同应力集中程度明显相关, 且远场处趋于一致。

(3) 基于临界平面法和传统的热点法所得到的预测寿命均偏保守, 其分散带大于 5 倍, 且应力集中程度越大其保守程度越大。进一步地, 将 TCD 引入临界平面法。结果发现, 以尖锐缺口试件为标准确定临界距离分布规律后, 其预测结果极其保守; 利用平均处理思想时其预测精度提高至 10 倍分散带, 但该方法不利于实际工程应用; 最后, 本文提出一种 K_t 修正的 TCD 处理方法, 其预测精度有提高至 2 倍分散带。

参 考 文 献

- [1] 周天朋, 杨晓光, 候贵仓, 等. DZ125 带小孔构件低循环/保载疲劳试验与分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1526-1531.
ZHOU Tianpeng, YANG Xiaoguang, HOU Guicang, et al. Experimental analysis of low-cycle and creep fatigue for directionally solidified DZ125 with a hole[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1526-1531.
- [2] 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[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 276-280.
ZHOU Tianpeng, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi, et al. Modeling of low-cycle and creep fatigue life for DZ125 smooth specimens and small hole components[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 276-280.
- [3] 彭凡, 姚云建, 顾勇军. 考虑热点应力梯度的焊接接头疲劳评定[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 65-69.
PENG Fan, YAO Yunjian, GU Yongjun. Fatigue assessment of welded joints considering hot spot stress gradient[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 65-69.
- [4] 许金泉, 郭凤明. 疲劳损伤演化的机理及损伤演化律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 40-46.
XU Jinquan, GUO Fengming. Mechanism of fatigue damage evolution and the evolution law[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 40-46.
- [5] 吴志荣, 胡绪腾, 宋迎东. 基于最大切应变幅和修正 SWT 参数的多轴疲劳寿命预测模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 59-66.
WU Zhirong, HU Xuteng, SONG Yingdong. Multi-axial fatigue life prediction model based on maximum shear strain amplitude and modified SWT parameter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 59-66.

- [6] NEUBER H. Theory of notch stresses: Principles for exact stress calculation[M]. Ann Arbor(MI): JW Edwards, 1946.
- [7] PETERSON R E. Notch sensitivity[M]. New York: McGraw Hill, 1959.
- [8] TAYLOR D. Geometrical effects in fatigue: A unifying theoretical model[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: 413-420.
- [9] 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 and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2007, 30(7): 567-581.
- [10] 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[C/CD]// Proceedings of FATIGUE 2006. Atlanta, USA: 2006.
- [11] 张莉, 程靳, 李新刚. 基于临界平面法的缺口件疲劳寿命预测方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 824-826.
- ZHANG Li, CHENG Jin, LI Xingang. The fatigue life prediction method of notched specimen based on the critical plane[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 824-826.
- [12] WAN J S, YUE Z F. A low-cycle fatigue life model of nickel-based single crystal superalloys under multiaxial stress state[J]. Materials Science and Engineering A, 2005(392): 145-149.
- [13] YANG Xiaoguang, WANG Jingke, LIU Jinglong. 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.
- [14] LEIDERMARK D, MOVERARE J, SIMONSSON K, et al. Fatigue crack initiation in a notched single-crystal superalloy component[J]. Procedia Engineering, 2010, 2: 1067-1075.
- [15] LEIDERMARK D, MOVERARE J, SIMONSSON K, et al. A combined critical plane and critical distance approach for predicting fatigue crack initiation in notched single-crystal superalloy components[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33: 1351-1359.
- [16] 刘金龙, 石多奇, 杨晓光. 应变比对定向凝固高温合金 DZ125 低循环疲劳行为影响的研究[J]. 材料工程, 2010(12): 47-51.
- LIU Jinlong, SHI Duoqi, YANG Xiaoguang. Study on influence of strain ratio on low cycle fatigue behavior of directionally solidified superalloy DZ125[J]. Materials Engineering, 2010(12): 47-51.
- [17] 王井科. 镍基高温合金及钛合金缺口疲劳问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- WANG Jingke. Investigation on notch fatigue of Ni-based superalloy and Ti-alloys[D]. Beijing: Beihang University, 2011.
- [18] 刘金龙. 镍基单晶/定向凝固涡轮叶片铸造模拟及其合金低循环疲劳行为研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
- LIU Jinlong. Investigation on cast simulation and low cycle fatigue behavior of Ni-based single crystal and directionally solidified turbine blade[D]. Beijing: Beihang University, 2011.
- [19] ARAKERE N K, SWANSON G. Effect of crystal orientation on fatigue failure of single crystal nickel base turbine blade superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME, 2002, 124: 161-176.
-
- 作者简介: 黄佳, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为镍基高温合金材料疲劳蠕变性能。
E-mail: huangjia216@126.com
- 杨晓光, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高温结构强度。
E-mail: yxg@buaa.edu.cn
- 石多奇(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为高温结构强度。
E-mail: shdq@buaa.edu.cn