

高温合金电子束焊接头缺口疲劳寿命预测

刘小刚, 于盛吉, 许 磊

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了研究 GH4169 电子束焊接头缺口疲劳寿命预测方法, 设计并开展了其缺口件的疲劳试验, 基于临界距离理论, 提出了适用于不同缺口形状的电子束焊接头疲劳寿命预测方法。通过试验, 获得了 GH4169 电子束焊接头 U 型、V-1 型及 V-2 型 3 种缺口件的名义应力-寿命曲线。基于 V-2 型缺口件试验结果, 提出了一种临界距离的反推方法, 确定了 GH4169 电子束焊接头缺口件的特征尺寸。据此, 分别采用临界距离点法和线法对缺口件疲劳寿命预测。结果表明: 临界距离点法对文中缺口件的适应性更好。进一步分析发现, 对于不同缺口形状, 当其理论应力集中系数相近时, 采用相同的特征尺寸可以获得较好的寿命预测结果, 均在 2 倍分散带以内。

关 键 词: GH4169 合金; 电子束焊接头; 缺口疲劳; 临界距离理论 (TCD); 疲劳寿命预测

中图分类号: V261.9

文献标志码: A

Fatigue life prediction of electron beam welding joint of superalloy

LIU Xiaogang, YU Shengji, XU Lei

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to study the prediction method of notch fatigue life of GH4169 electron beam welded joints, the fatigue tests of notched specimens were designed and carried out. Based on the critical distance theory, the fatigue life prediction method for different notch shapes of electron beam welded joints was proposed. The nominal stress-life curves of three notched specimens of GH4169 electron beam welded joints (U type, V-1 type and V-2 type) were obtained through tests. Based on the test results of V-2 notched parts, an inverse method of critical distance was proposed to determine the characteristic dimensions of GH4169 electron beam welding notched joints. The fatigue life of notched joints was predicted by the critical distance point method and the line method, respectively. The results showed that the critical distance point method had better adaptability to the notched joints. Further analysis showed that for different notch shapes, when the theoretical stress concentration coefficients were similar, better life prediction results can be obtained by using the same characteristic size in the double dispersion zone.

Keywords: GH4169 alloy; electron beam welding joint; notch fatigue;
theory of critical distance (TCD); fatigue life prediction

GH4169 高温合金是航空发动机燃烧室机匣的重要材料之一, 因其具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化和耐腐蚀等特性, 在-253~650 ℃ 使

用温度范围内得到广泛应用^[1]。同时, 由于 GH4169 具有较强的抗应变时效开裂性能, 因此该合金也具备良好的可焊接性^[2-3]。

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家科技重大专项(2017-IV-0012-0049); 中央高校基本科研业务费(NS2021014)

作者简介: 刘小刚(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构疲劳与断裂力学方面的研究。

引用格式: 刘小刚, 于盛吉, 许磊. 高温合金电子束焊接头缺口疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1210-1216. LIU Xiaogang, YU Shengji, XU Lei. Fatigue life prediction of electron beam welding joint of superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(5): 1210-1216.

燃烧室机匣上有大量的安装座、安装边等结构,在新型高性能发动机中,这些部位大多采用了电子束焊连接,这样设计能大幅度简化机匣结构,减轻航空发动机的总质量^[4]。相比于传统的焊接工艺,电子束焊作为一种先进的焊接技术,具有能量密度高、深度比大、焊缝热影响区小和在真空环境下焊缝纯净等优点,同时因其不会显著降低焊接接头的力学性能,电子束焊逐渐被公认为是 GH4169 的最佳焊接方法之一^[5-7]。然而,发动机工作时,燃烧室机匣承受周期性变化的高温、高载荷,焊接部位往往是其疲劳破坏的薄弱环节^[8]。GH4169 电子束焊接头的疲劳寿命预测,尤其是考虑应力集中影响的缺口部位疲劳寿命精确评估对保障航空发动机安全、可靠地工作具有重要意义。

经过数十年来的研究和发展,研究者对缺口疲劳寿命预测问题的认识逐渐深入,目前已经形成了多种缺口疲劳寿命预测方法。最常用的有经验公式法,该方法^[9]通过引入疲劳缺口系数 K_f 对缺口件名义应力进行修正的疲劳寿命预测方法,常用的有 Neuber 法和 Peterson 法。由于计算简单,经验公式法成为预测结构疲劳寿命的常用方法,但该方法只需考虑缺口应力集中系数和材料的特征长度,预测结果偏于保守。随着 Manson^[10]和 Coffin^[11]在各自的研究基础上提出了 Manson-Coffin 方程,局部应力应变法得到了发展,并广泛应用于缺口疲劳寿命的预测研究,但研究表明材料的疲劳失效过程不仅与缺口根部某一点的最大应力有关,还与缺口根部的应力分布有着很大的关系,而局部应力应变法只使用最大应力点的参量来评估缺口件的疲劳寿命,预测精度往往有限。在传统疲劳预测方法的基础上,考虑应力分布和梯度的影响,研究者们进一步发展了最弱环理论和临界距离理论。最弱环理论最早是由 Weibull^[12]提出的,Weibull 分布具有出色的数据拟合能力,后来被广泛应用于描述构件的疲劳强度分布,最弱环理论^[13]将构件分为若干个具有特定长度、面积、体积的单元,在特定加载条件下,某一单元发生失效就会导致整个结构发生破坏,然而该方法对若干个单元的有限元应力计算精度要求较高。临界距离理论^[14]则认为缺口件的疲劳寿命不仅与缺口处的最大应力有关,还与最大应力点沿着薄弱面的应力梯度有关,这种方法考虑了实际薄弱面上应力分布,结果更为合理。Neuber^[15]发现

了缺口处应力集中对疲劳强度的影响即应力梯度效应,提出采用缺口根部一定距离上单元的平均应力作为有效应力进行强度预测的思想,即线法,并首先将临界距离理论用于预测缺口件疲劳强度。后来, Peterson 等^[16]对 Neuber 的思想进行了简化,在原有的研究基础上提出了点法,即以距离缺口根部一定距离上一点的应力作为有效应力来进行预测,该方法具有较好的精度。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。随后, Taylor 等^[17-19]在前人研究的基础上,将所有基于临界距离这一思想的疲劳强度预测方法统一为临界距离理论(theory of critical distance, TCD)。为了提高基于临界距离理论的疲劳寿命预测准确性,研究者们开展了大量的工作。David 等^[20]基于临界距离理论开展了 TC4 平板和圆棒缺口试样的高循环疲劳预测,结果发现:临界距离具有一定的尺寸效应,不同几何形状的缺口临界距离有着较大的差别,但由于试验量较小,并没有对临界距离和缺口几何尺寸的关系作进一步的研究。Susmel、Yamashita 等^[21-23]将临界距离理论应用于缺口试样中、低循环疲劳寿命预测研究,结果表明临界距离理论对预测缺口疲劳寿命具有潜在的优势。杨晓光、Yamashita 等^[23-24]的研究结果表明,只有假设临界距离与应力集中系数和疲劳寿命相关,才能得到较好的寿命预测结果。

综合来看,对于材料的缺口疲劳寿命预测已开展了大量研究,对于焊接接头缺口疲劳的研究仍然较少。本文针对 GH4169 电子束焊接头的缺口疲劳寿命预测开展研究,开展多种缺口件的疲劳试验,基于临界距离理论发展其疲劳寿命预测方法,并探究了该方法对不同缺口形状、尺寸的适用性。

1 方 法

1.1 临界距离理论

临界距离理论最早由 Tanaka 和 Taylor 先后提出^[25],该方法考虑缺口处最大应力点沿着损伤平面的应力梯度对缺口件的疲劳寿命产生影响,将缺口附近临界区域(该区域可为点、线、面或体)中最大主应力场的平均应力视为主导疲劳损伤的特征应力。Wang、Susmel^[26]将其归类为点法(point method, PM)、线法(line method, LM)和面法(area method, AM)。

点法是以距离缺口根部一定距离处某点的应力变程作为有效应力变程,如图1(a)、图1(b),图中 x 、 y 为该点笛卡尔坐标, r 、 θ 为极坐标, $\Delta\sigma_y$ 、 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ 分别为应力变程和有效应力变程, N_f 为疲劳寿命, L_m 为特征尺寸,当该点有效应力达到光滑件的疲劳强度时发生疲劳失效,其表达式为:

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \Delta\sigma_y \quad \theta = 0^\circ, r = \frac{L_m(N_f)}{2} \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ 为有效应力变程, $\Delta\sigma_y$ 为垂直于焊缝的正应力变程,对于点法临界距离 r 为特征尺寸 L_m 的一半。

线法是以距离缺口根部一定距离内的线段上的平均应力作为有效应力,如图1(c),其表达式为

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{2L_m(N_f)} \int_0^{2L_m(N_f)} \Delta\sigma_y(\theta = 0^\circ, r) dr \quad (2)$$

面法是以距离缺口根部一定距离处的面积内的平均应力作为有效应力,如图1(d),其有效应力计算公式为

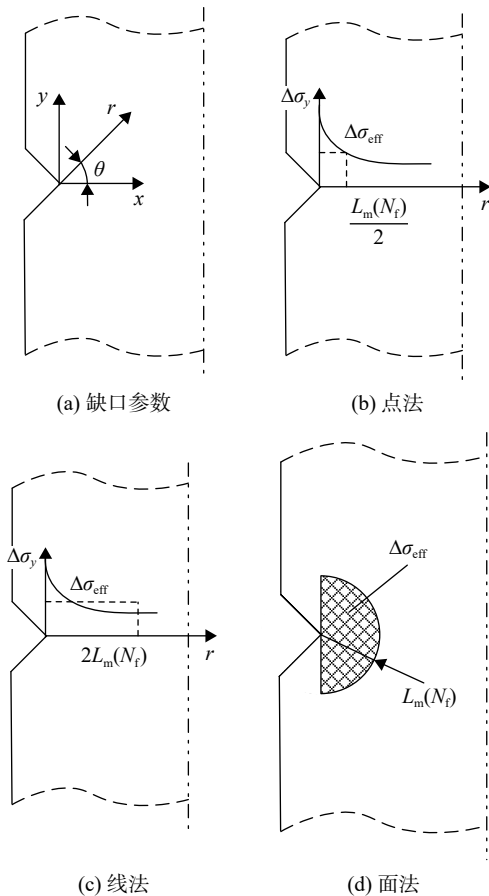


图1 TCD中的点法、线法和面法

Fig. 1 TCD applied in the form of the point, line and area method

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \frac{4}{\pi L_m^2(N_f)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{L_m(N_f)} \Delta\sigma_y(\theta, r) r dr d\theta \quad (3)$$

根据Zamzami等^[27]、Susmel等^[21-22]的研究结果,特征尺寸 L_m 与疲劳寿命循环数 N_f 之间可由下面的关系式表示

$$L_m(N_f) = AN_f^B \quad (4)$$

式中 A 、 B 为材料常数。

1.2 临界距离反推方法

根据上述,文中提出一种临界距离反推算法。当已有光滑件和缺口件疲劳试验结果时,可以根据光滑件及缺口件的疲劳寿命曲线,结合缺口件有限元计算得到的不同载荷下缺口根部应力分布曲线,计算出 L_m 与 N_f 之间的关系,进而得到式(4)中 A 、 B 的值,从而确定特征尺寸 L_m 。

该方法的具体实施过程如图2所示。在缺口件 $\Delta\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 曲线上选取若干个点,将其对应的名义应力变程 $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ 代入缺口件 $\Delta\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 曲线中,求出每个载荷级对应的理论寿命 $N_{f,1}^*$ 、 $N_{f,2}^*$ 、 $N_{f,3}^*$ 、...,再将该理论寿命代入光滑件 $\Delta\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 曲线,求出相同寿命下光滑件所对应的名义应力变程,即为

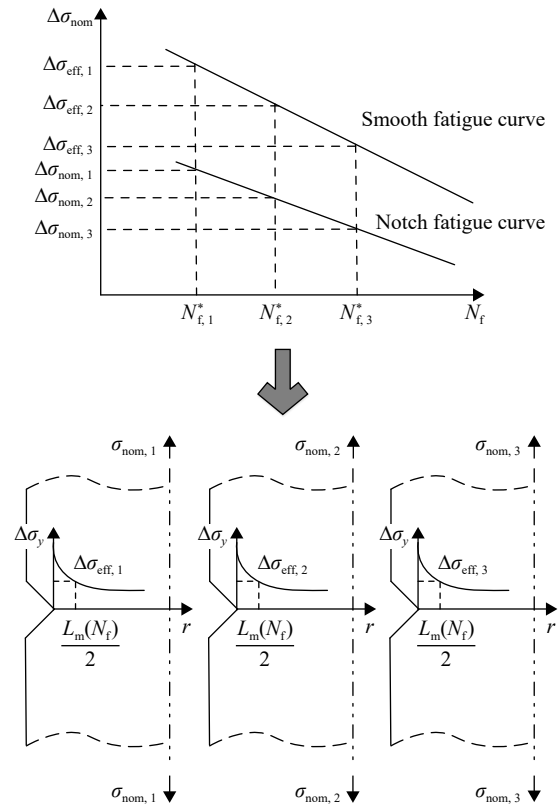


图2 两种疲劳曲线下 L_m-N_f 关系

Fig. 2 L_m-N_f relationship by using two different fatigue curves

临界距离理论修正后的有效应力变程 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ 。采用有限元软件计算出缺口件根部沿焊缝应力分布情况,找到与上述光滑件名义应力相同的点,进而可以确定各个载荷级下的特征尺寸 L_m 。

1.3 电子束焊接头缺口件疲劳试验

本文共设计开展光滑件及 3 种缺口件疲劳试验,3 种缺口件分别为:U 型缺口件、V-1 型缺口件(缺口半径 $R=1\text{ mm}$)、V-2 型缺口件(缺口半径 $R=2\text{ mm}$)。研究临界距离理论对不同缺口形状、尺寸及应力集中系数条件下的适用性。试验件均采用 2.5 mm 厚的 GH4169 电子束焊接头板材加工,各试验件尺寸如图 3 所示。

针对上述缺口件,采用有限元模拟计算出各类型缺口件的理论应力集中系数 K_t ,如表 1 所示。

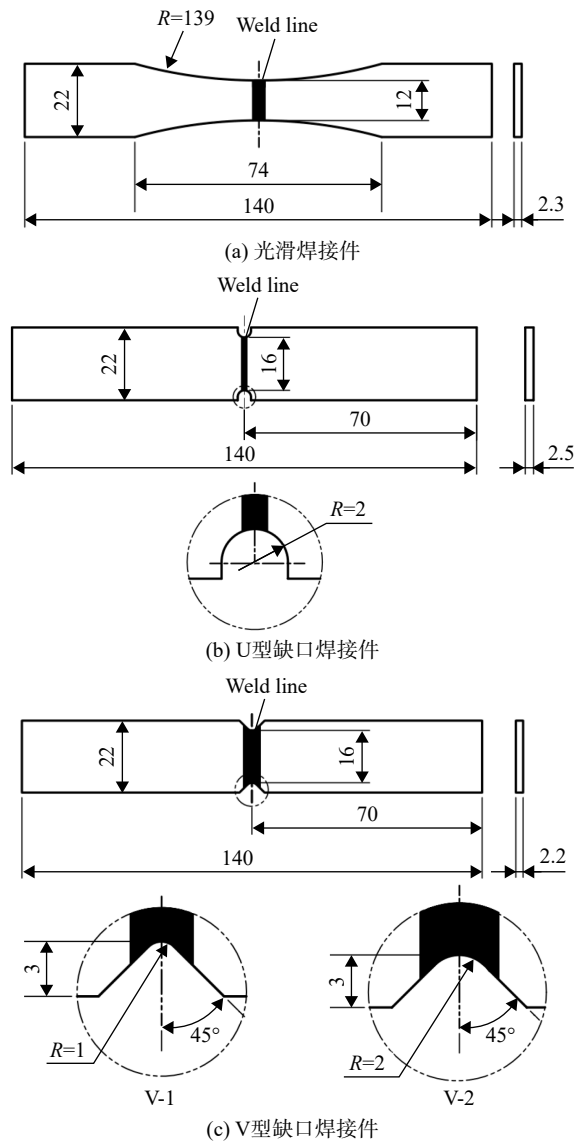


图 3 焊接接头试验件尺寸(单位: mm)
Fig. 3 Size of welded test pieces (unit: mm)

其中 U 型缺口件和 V-2 型缺口件的理论应力集中系数较为接近,而 V-1 型缺口件的理论应力集中系数相对较大。

表 1 各缺口的理论集中系数 K_t
Table 1 K_t of each notched joint

缺口类型	K_t
U 型缺口	2.42
V-1 型缺口	3.02
V-2 型缺口	2.47

试验在 MTS (mechanical testing and simulation) 疲劳试验机上进行,采用载荷控制加载,加载波形为正弦波,应力比为 0.1,频率为 10 Hz ,试验直至试验件完全断裂为止。每种类型试验件开展 5 个载荷级下的疲劳试验,每个载荷级至少保证 3 个以上有效数据。各载荷级下的试件最小截面处名义应力 $\sigma_{\text{nom},i}$ ($i=1\sim 5$,表示载荷级)如表 2 所示。

表 2 试验载荷级
Table 2 Test load class

载荷级	光滑件	U 型缺口	V-1 型缺口	V-2 型缺口
$\sigma_{\text{nom},1}/\text{MPa}$	1 024	443	428	583
$\sigma_{\text{nom},2}/\text{MPa}$	956	416	388	533
$\sigma_{\text{nom},3}/\text{MPa}$	878	383	358	483
$\sigma_{\text{nom},4}/\text{MPa}$	805	356	328	433
$\sigma_{\text{nom},5}/\text{MPa}$	732	328	298	383

2 结果和分析

2.1 GH4169 电子束焊接头疲劳试验结果

本文研究对象是焊接头缺口件疲劳寿命,故选取在焊缝处断裂的试验数据为有效数据。图 4 为根据试验有效数据整理得到的各种情况下 σ_{nom} 与 N_f 之间的关系曲线。

U 型缺口件与 V-2 型缺口件缺口尺寸相同,应力集中系数相近,仅存在缺口形状差异;而 V-1 型缺口件与 V-2 型缺口件缺口形状相同,仅缺口根部半径不同,导致应力集中系数不同。本文选择 V-2 型缺口件来确定 GH4169 高温合金电子束焊接头缺口件的特征尺寸。式(5)和式(6)分别为根据试验数据拟合得到的光滑件和 V-2 型缺口件的 $\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 方程。

$$\lg \sigma_{\text{nom}} = 3.901\,2 - 0.191\,1 \lg N_f \tag{5}$$

$$\lg \sigma_{\text{nom}} = 4.259\,3 - 0.307\,7 \lg N_f \tag{6}$$

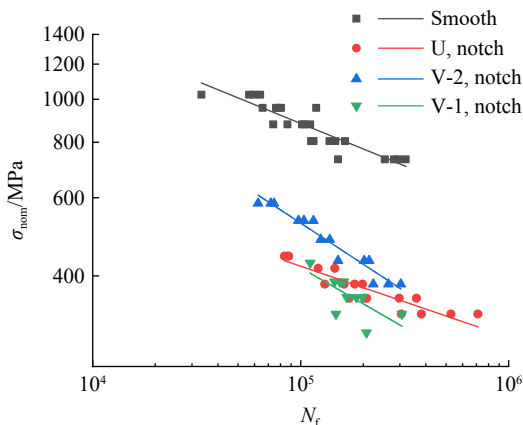


图 4 各试验件 $\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 曲线
Fig. 4 $\sigma_{\text{nom}}-N_f$ curve of each test piece

2.2 缺口件特征尺寸

文中疲劳试验应力比均为 0.1, 故名义应力变程 $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ 和最大名义应力 σ_{nom} 的换算关系如式(7)所示。

$$\Delta\sigma_{\text{nom}} = 0.9\sigma_{\text{nom}} \quad (7)$$

将 V-2 型缺口件各载荷级对应的名义应力代入式(6)中, 计算出不同载荷级对应的理论寿命 N_f^* , 再将该理论寿命代入光滑件 $\sigma_{\text{nom}}-N_f$ 曲线方程式(5)中, 求出相同寿命的光滑件对应的最大名义应力, 即有效名义应力 σ_{eff} , 结合式(7), 计算出对应的有效名义应力变程 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ 。

采用 ANSYS 软件计算 V-2 型缺口试验件在各载荷级下的缺口根部应力分布情况。采用 8 节点六面体实体单元进行网格划分, 夹持段的网格尺寸为 1 mm, 缺口及焊缝处为重点考察对象, 网格尺寸为 0.1 mm, 共 319 014 个节点, 71 997 个单元。在夹持段一端端面上施加固支约束, 在另一端端面上施加应力载荷, 使缺口处最小截面所承受的名义应力为试验最大名义应力, 模拟得到应力云图如图 5 所示, 其最大值为 1 408 MPa, 发生在缺口根部。

在缺口根部沿焊缝定义路径, 沿该路径输出结果, 可以得到该路径上的应力, 即缺口根部的应力分布情况, 不同载荷级下的输出结果如图 6 所示。在图 6 中找到各个载荷级对应的有效应力变程 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$, 如 $\sigma_{\text{nom},1}=583$ MPa 载荷级对应的有效应力变程 $\Delta\sigma_{\text{eff}}=847$ MPa, 进而可以确定其对应的特征尺寸 L_m , 具体结果列于表 3。

对表 3 中理论疲劳寿命循环数 N_f^* 及其对应的特征尺寸 L_m 进行最小二乘法拟合, 得到 V-2 型缺

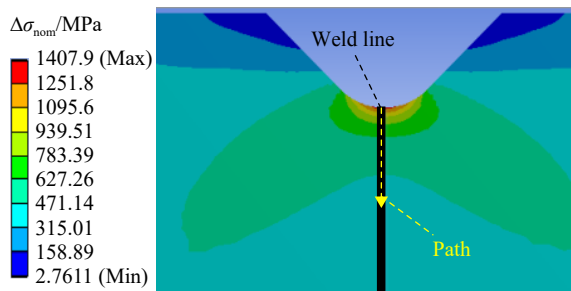


图 5 应力云图
Fig. 5 Stress nephogram

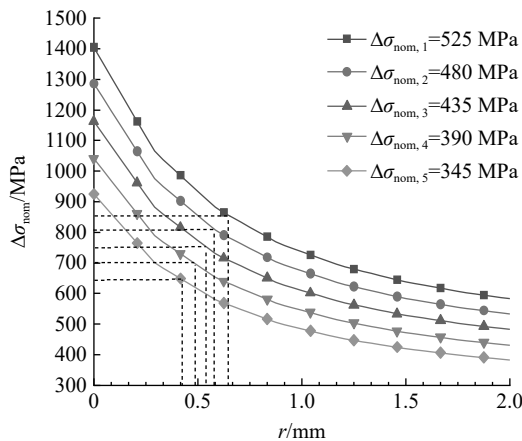


图 6 V-2 型缺口试验件根部应力分布
Fig. 6 Stress distribution at the root of V-2 notch test piece

表 3 V-2 型缺口焊接接头试验件特征尺寸
Table 3 Characteristic dimensions of V-2 notch welded test pieces

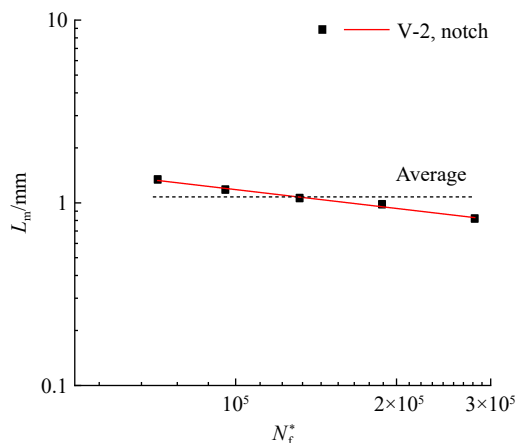
$\sigma_{\text{nom}}/\text{MPa}$	N_f^*	L_m/mm
583	71 479	1.3
533	95 661	1.2
483	131 755	1.1
433	187 934	1.0
383	280 022	0.9

口件的 $L_m-N_f^*$ 曲线, 拟合结果如图 7 所示。根据拟合结果, 求得特征尺寸与疲劳寿命循环数之间的公式如式(8)所示。

$$L_m = 61.161 8 N_f^{*-0.342 9} \quad (8)$$

将最低寿命和最大寿命代入式(8)中, 求出其对应的特征尺寸分别为 0.9 mm 和 1.3 mm, 可以看出, 在文中所研究的寿命范围内, 特征尺寸之间差距很小, 因此文中将上述 L_m 的平均值作为 GH4169 电子束焊接头缺口件的特征尺寸 $\bar{L}_m$, 可得到

$$\bar{L}_m = 1.1 \text{ mm} \quad (9)$$

图7 V-2型缺口焊接接头试验件 $L_m-N_f^*$ 曲线Fig. 7 $L_m-N_f^*$ curve of V-2 notch welded test pieces

2.3 缺口件寿命预测

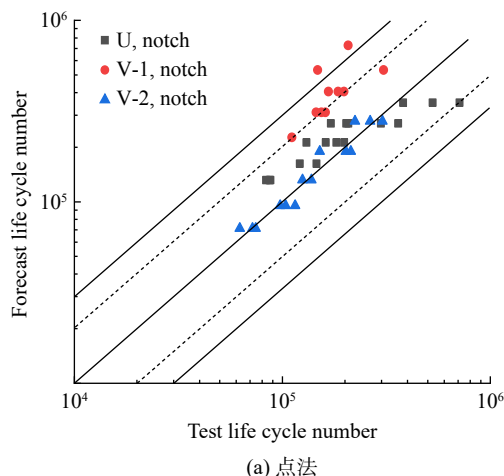
采用上述方法确定电子束焊接头缺口件的特征尺寸后,计算3种缺口件的有效应力,进而实现缺口件疲劳寿命预测。

本文分别采用点法和线法对3种缺口件的试验结果进行处理,预测不同缺口的疲劳寿命,并进行比较。图8(a)为点法预测结果,图8(b)为线法预测结果。

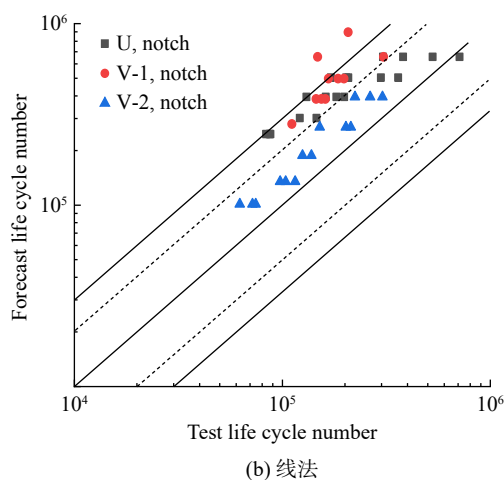
比较图8(a)和图8(b)可以发现,采用点法预测时,所有数据点均较为均匀的分布在预测值两侧,且基本都在3倍分散带以内,而采用线法预测时,数据点基本都比预测值偏小,说明采用线法对本文焊接头缺口件寿命评估偏于危险。相比而言,采用点法进行焊接头缺口件疲劳寿命预测更为准确。

进一步分析,从图8(a)中可以看出,U型缺口件和V-2型缺口件的预测结果都在2倍分散带以内,预测精度较高,而V-1型缺口件的预测结果大部分都在2倍分散带以外,甚至个别结果会在3倍分散带以外,表明文中得到的特征尺寸对于U型和V-2型这两种缺口件的适用性更好。

分析比较3种缺口件的尺寸形状可知,U型缺口件与V-2型缺口件仅缺口形状不同,缺口尺寸相同,应力集中系数相近,分别为2.42和2.47;而V-1型缺口件 $K_t = 3.02$,与其他两种缺口件的应力集中系数相差较大。说明文中确定的GH4169高温合金电子束焊接头缺口件临界距离对于形状不同但应力集中系数相近的缺口,具有较好的适用性。



(a) 点法



(b) 线法

图8 预测寿命循环数与试验寿命循环数对比

Fig. 8 Comparison of forecast life and test life cycle number

3 结论

本文针对GH4169电子束焊接头进行了光滑件及3种缺口件的疲劳试验,结合有限元计算,基于临界距离理论对其疲劳寿命预测方法开展研究,得到以下结论:

1) 设计并开展了GH4169电子束焊接头U型、V-1型及V-2型3种缺口件的疲劳试验,根据试验结果拟合,获得各自的名义应力-寿命曲线。

2) 以光滑件及V-2型缺口件的名义应力-寿命曲线为基础,采用临界距离理论结合有限元模拟计算,提出了焊接接头缺口件的临界距离反推方法,并确定了GH4169电子束焊接头缺口件的特征尺寸 $\bar{L}_m = 1.1 \text{ mm}$ 。

3) 在上述研究的基础上,分别采用点法和线法对3种缺口件的疲劳寿命进行预测,结果表明线法预测结果偏于危险,点法预测更为准确。对比3种缺口件临界距离点法的预测结果,发现文中确定的缺口件特征尺寸对应力集中系数相近

的U型和V-2型缺口件的寿命预测均在2倍分散带以内,而对于应力集中系数较大的V-1型缺口件分散性相对较大。表明该方法对于应力集中系数相近的缺口件适应性更好。

参考文献:

- [1] 刘强,柳万珠. GH4169G整体叶盘阶梯铣削稳定性研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1025-1031.
LIU Qiang, LIU Wanzhu. Stability research on step milling of GH4169G blisk[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1025-1031. (in Chinese)
- [2] 陈曦,董金龙,陈昊,等. GH4169晶粒尺寸的双目标超声评价方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(4): 816-825.
CHEN Xi, DONG Jinlong, CHEN Hao, et al. Double objective ultrasonic evaluation method for grain size of GH4169[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(4): 816-825. (in Chinese)
- [3] DAMODARAN R, DAMAN S G S, RAO K P. Microstructure and mechanical properties of friction welded alloy 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 560(10): 781-786.
- [4] 蒋绍堂. 电子束焊接在中小航空发动机上的应用[J]. 中国科技纵横, 2014, 13(7): 81-82.
JIANG Shaotang. Application of electron beam welding in small and medium aero engine[J]. China Science and Technology, 2014, 13(7): 81-82. (in Chinese)
- [5] 齐红宇,李少林,杨晓光,等. 锻造TC4钛合金电子束焊接接头的疲劳破坏机制[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 264-269.
QI Hongyu, LI Shaolin, YANG Xiaoguang, et al. Fatigue failure mechanism of forged TC4 alloy joints by electron beam welding[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 264-269. (in Chinese)
- [6] 陈国庆,张秉刚,冯吉才,等. 电子束焊接在航空航天工业中的应用[J]. 航空制造技术, 2011, 54(11): 42-45.
CHEN Guoqing, ZHANG Bingang, FENG Jicai, et al. Application of electron beam welding in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(11): 42-45. (in Chinese)
- [7] 魏祺,敖三三,王泰,等. 镍基合金 GH4169 电子束焊接头高温稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2578-2585.
WEI Qi, AO Sanan, WANG Tai, et al. High temperature stability of Ni-base GH4169 electron beam welded joints[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11): 2578-2585. (in Chinese)
- [8] 高德平,范引鹤,龚良慈,等. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)第4册:机匣[M]. 北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局, 1997.
- [9] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [10] MANSON S. Behavior of materials under condition of the thermal stress[R]. National Advisory Committee for Aeronautics 1170, 1953.
- [11] COFFIN L F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal[J]. Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, 1954, 76(6): 931-950.
- [12] WEIBULL. A statistical distributions function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293-297.
- [13] 辛朋朋. 基于最弱环理论的缺口疲劳寿命预测方法[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
XIN Pengpeng. Notch fatigue life prediction method based on weakest loop theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [14] 王昊元,吴昊. 基于改进临界距离理论的多轴缺口疲劳寿命预测[J]. 工程机械, 2020, 51(9): 31-40.
WANG Haoyuan, WU Hao. Multiaxial notches fatigue life prediction base on improved critical distance[J]. Construction Machinery, 2020, 51(9): 31-40. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] PETERSON R E, SINES G, WAISMAN J L. Notch sensitivity in metal fatigue[M]. New York: Mc-Graw Hill, 1959.
- [17] TAYLOR D. The theory of critical distances[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 75(7): 1696-1705.
- [18] TAYLOR D. Applications of the theory of critical distances in failure analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 18(2): 543-549.
- [19] TAYLOR D. Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(5): 413-420.
- [20] DAVID B L, THEODORE N, GEORGE K H. On the use of critical distance theories for the prediction of the high cycle fatigue limit stress in notched Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 27(1): 45-57.
- [21] 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.
- [22] SUSMEL L, TAYLOR D. An elastoplastic reformulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notches components failing in the low/medium-cycle fatigue regime[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2010, 132(2): 021002.1-021002.8.
- [23] 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.
- [24] YANG X G, WANG J K, LIU J L. Systematic methodology for high temperature LCF life prediction of smooth and notched Ni-based superalloy with and without dwells[J]. Computational Materials Science, 2014, 89(15): 65-74.
- [25] TAYLOR D, HOEY D. High cycle fatigue of welded joints: the TCD experience[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(6): 20-27.
- [26] WANG Y Y, SUSMEL L. The modified manson-coffin curve method to estimate fatigue lifetime under complex constant and variable amplitude multiaxial fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83(2): 135-149.
- [27] ZAMZAMI I A, RAZAVI S M J, BERTO F, et al. The critical distance method to estimate the fatigue strength of notched additively manufactured titanium alloys[J]. Procedia Structural Integrity, 2020, 28: 994-1001.

(编辑:王碧琨)