

镍基高温合金电子束焊接头的疲劳极限研究

李张辉,朱阳阳

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为给出焊接接头准确的疲劳极限,利用高周疲劳试验机进行了 GH4169 电子束焊接头的高周疲劳试验,研究了材料的疲劳极限性能。分别利用升降法和极小样本法对试验数据进行处理,得到了基于两种方法的 GH4169 电子束焊接头的疲劳极限,二者的预估计算结果较为接近且与试验结果吻合。

关键词:镍基合金;电子束焊接头;升降法;极小样本法;疲劳极限

中图分类号:V252.2; TB302.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0048-03

Research on Fatigue Limit of Nickel-based Superalloy Electron Beam Welding

LI Zhanghui, ZHU Yangyang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To give the accurate fatigue limit of welded joints, the high-cycle fatigue tests of the GH4169 electron-beam welded joints are carried out with high-cycle fatigue testing machine. The fatigue limit performance of the material is analyzed. The lifting method and the minimal sample method are respectively applied to process the test data to obtain the fatigue limit of GH4169 electron-beam welding joint based on the two methods, whose estimated calculation results are relatively close and consistent with the actual results.

Keywords: nickel-based superalloy; electron beam welding; lifting method; minimal sample method; fatigue limit

0 引言

随着高推重比、大推力、高可靠性成为航空发动机的发展方向,焊接结构在发动机中的应用日益广泛。新型发动机的研制过程中采用了许多新技术、新材料和新工艺。其中焊接结构由于具有工作效能高、能够有效减轻结构质量以及减少不必要的连接件等优点,在航空发动机中得到了越来越多的应用^[1-2]。

燃烧室机匣是航空发动机的最重要承力构件之一,其安全性直接影响到航空发动机的可靠性。GH4169 镍基高温合金不但具有良好的抗疲劳、耐高温和耐腐蚀性能,还具有良好的可加工性,可以满足燃烧室机匣的性能要求, GH4169 是燃烧室机匣的重要材料之一^[3-4]。航空发动机燃烧室机匣的安装边和安装座等部位均采用了电子束焊^[5],其具有输入功率密度高,焊接热量输入低,焊接后零件变形小及残余应力小等特点^[6]。由于疲劳载荷的作用,这些焊接部位往往是机匣疲劳破坏的薄弱环节之一。由于大多数工程结构和机械构件需要满足长寿命使用要求,使得承力结构循环应变主要以弹性变形为主,呈现高周疲劳损伤失效的一般特点。因此研究高周疲劳极限预测方法对结构件抗疲劳设计至关重要。

相比较于母材,电子束焊接头焊缝通常是易破坏点,并且容易发生高周疲劳破坏导致整体结构的失效。因此 GH4169 焊接接头的高周疲劳性能为国内外学者所关注,

并取得了一定的研究成果。燕怒等^[7]通过对 GH4169 的高周疲劳试验以及断口分析发现,材料 S-N 曲线呈逐渐下降趋势,没有出现工程上的疲劳极限,且在超过 10^7 循环周次下试样仍发生了疲劳破坏。马文彬等^[8]通过对 GH738 进行超声疲劳研究,获得了超高周疲劳特征典型 S-N 曲线,在超过 10^7 循环周次甚至达到 10^9 循环周次之后 GH738 仍会继续发生疲劳断裂,不存在传统意义的疲劳极限,同时 S-N 曲线出现阶梯型特征。傅惠民等^[9]通过极小样本法,采用至少 8 根试验件得到高可靠度的安全疲劳极限。

由此可以看出,目前的疲劳寿命研究大多针对于母材的性能,在建立模型时也未给出准确的疲劳极限。因此本文对 GH4169 焊接接头在不同载荷级下进行高周疲劳试验,得到了较为可靠的疲劳极限,为 GH4169 合金的开发应用提供重要的试验依据。

1 实验材料及方法

试验选取的材料为 GH4169 焊接接头,高温合金的质量分数如表 1 所示。准备好的板材初始状态为固溶态(960°C 下保温 1h),电子束焊后再进行时效强化,电子束焊参数如表 2 所示。试验件设计如图 1 所示。在加工好的板材排版后进行试验件加工,总计 45 根试验件,如图 2 所示。

为了研究 GH4169 焊接接头的疲劳极限性能,查阅相

关文献后选取首个载荷为 610 MPa, 应力增量为 $5\% \sigma_{-1}$ 。若上一根试验件在不到 10^7 次循环时发生疲劳断裂, 则下一根试验件的试验应力水平减小一个载荷级 (25 MPa), 反之若并未断裂 (越出) 则增大一个载荷级 (25 MPa), 直至完成所有的试验。视实际情况预计整个试验的应力水平在 3~5 个左右。试验采用应力控制加载, 在应力比 R 为 0.1, 试验机频率为 100 Hz 下进行疲劳加载, 加载波形为正弦波, 设定好参数后循环加载, 直到试验件断裂或是循环次数达到 10^7 停止试验。

表 1 GH4169 高温合金质量分数 单位: %

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C
52.5	19	5.3	3.1	0.95	0.5	0.05

表 2 电子束焊参数

设备型号	真空度/Pa	功率/kW	尺寸/mm
ZComple X3	1×10^{-2}	15	1 005×500×500

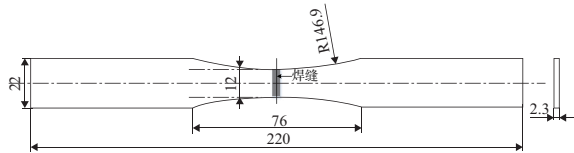


图 1 高周疲劳试验件

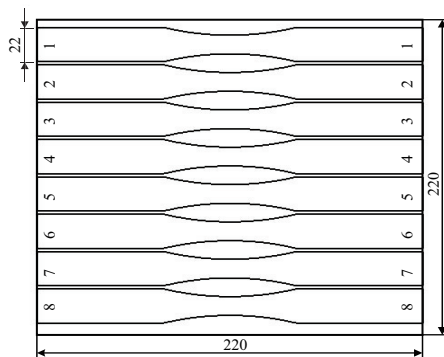


图 2 试验件加工排版

2 升降法计算 GH4169 焊接接头疲劳极限

基于升降法计算 GH4169 焊接接头疲劳极限, 如果试验第一次出现相反结果, 并且这之前的试验数据都不在之后试验数据的波动范围之内, 则要舍弃出现第一次相反结果之前的数据; 反之, 如果在上述波动范围之内, 就可以将其作为有效数据进行使用, 即在试验过程中, 陆续将它们平移至第一对相反结果之后, 这可以是该试样所在应力水平下第一个有效的数据。升降法的条件疲劳极限的计算公式如下:

$$\sigma_N = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n V_i \sigma_i \quad (1)$$

式中: m 为有效试验的总次数 (失效及通过的数据点均计

算在内); n 为试验应力水平级数; σ_i 为第 i 级的应力水平, V_i 为第 i 级应力水平下对应的试验次数。

本试验共得到如表 3 的 8 个数据。因第 4 次试验的试验件在夹持端损坏, 故该数据为无效数据。在后续处理绘图时将其舍弃, 分析其在夹持端损坏的原因可能是夹持力过大导致夹持端发生的变形过大, 产生了局部应力集中而引起的断裂。

表 3 疲劳极限试验结果

试验件编号	最大试验应力变化情况/MPa	最大试验应力/MPa	寿命是否超出
1	—	610	是
2	增加 25	635	是
3	增加 25	660	否
4	降低 25	635	否
5	不变	635	是
6	增加 25	660	否
7	降低 25	635	否
8	降低 25	610	是

根据表 3 基于升降法绘制升降图如图 3 所示, 第 4 次数据无效不出现在升降图中。试验次数的分配如表 4 所示。

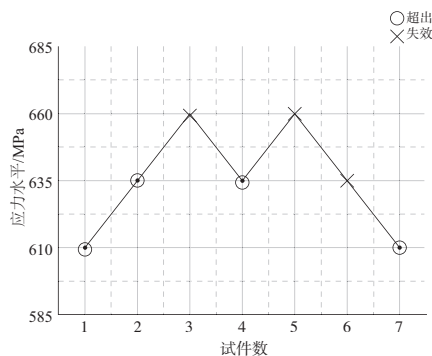


图 3 升降图

表 4 试验次数分配

应力/MPa	610	635	660
次数	1	3	2

将表 4 的试验数据代入公式 (1) 中, 可得

$$\sigma_N = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n V_i \sigma_i = \frac{1}{6} (635 \times 3 + 660 \times 2 + 610) = 639.2 \quad (\text{MPa})$$

故基于升降法的 GH4169 电子束焊接头在应力比 $R=0.1$ 条件下的疲劳极限是 639.2 MPa。

3 极小样本法计算 GH4169 焊接接头疲劳极限

傅惠民等^[9]曾提出了极小样本方法确定材料的疲劳

极限,在置信度和可靠度相同的情况下,该方法能综合利用以往积累的试验数据和当前的试验数据确定安全疲劳极限,极小样本法较之于传统方法能节省至少 50% 的试验件。

假设疲劳极限 $\sigma_N(S_N)$ 遵循正态分布(均值为 μ , 方差为 σ^2),则在一定条件满足时,可以由随机试验分解原理将升降法试验分解成多个最小升降法试验,各个最小升降法试验对于均值 μ 的最大似然估计量为

$$S_i^0 = \frac{S_i + S_{i-1}}{2} \quad (2)$$

式中 S_i^0 为对子应力,对子应力 S_i^0 遵循正态分布。

本次试验共有 4 个相反的对子,由式(2)可计算得出其对应的对子应力分别为:

$$S_1^0 = \frac{635+660}{2} = 647.5$$

$$S_2^0 = \frac{660+635}{2} = 647.5$$

$$S_3^0 = \frac{635+610}{2} = 622.5$$

$$S_4^0 = \frac{635+660}{2} = 647.5$$

至此,进一步证明了均值 μ 和方差 σ^2 的估计量可以通过下面各式计算得出:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_i n_i S_i^0 \quad (3)$$

$$\sigma^2 = n' s^2 \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i n_i (S_i^0 - \mu)^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$n' = 2e^{5(2.1-j/\ln 2v)/v} (s/d)^2 \quad (6)$$

式中: $v=n-1$ 是子样方差的自由度; j 是该试验的应力水平级数; $d=25$ MPa 是该试验的应力增量。本次试验中,子样方差自由度 $v=3$ 。应力水平级数 $j=3, n=4$, 代入上面各个公式中进行计算可得:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_i n_i S_i^0 = \frac{647.5 + 647.5 + 622.5 + 647.5}{4} = 641.25$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i n_i (S_i^0 - \mu)^2}{n-1}} = 12.5$$

$$n' = 2e^{5(2.1-j/\ln 2v)/v} (s/d)^2 = 1.469$$

$$\sigma^2 = n' s^2 = 15.1$$

故基于极小样本法的 GH4169 电子束焊接头在 $R=0.1$ 时的疲劳极限为 641.3 MPa, 标准差为 15.1。

4 结语

本文针对 GH4169 电子束焊接头的高周疲劳性能,使用不少于 8 根试验件就可以对疲劳极限进行较为准确的估计,分别用升降法以及极小样本法计算其疲劳极限。升降法计算 GH4169 电子束焊接头在 $R=0.1$ 时的疲劳极限为 639.2 MPa; 极小样本法求解出 GH4169 电子束焊接头在 $R=0.1$ 时的疲劳极限为 641.3 MPa, 二者计算结果较为接近。

参考文献:

- [1] 孔庆吉,曲伸,邵天巍,等. 钎焊及扩散焊技术在航空发动机制造中的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2010, 53(24): 82-84.
- [2] 赵伟,曲伸,杨烁,等. 激光焊接技术在发动机制造及修理中的应用[J]. 世界制造技术与装备市场, 2019(2): 85-87.
- [3] BELAN J. The fractography analysis of IN 718 alloy after fatigue test[J]. Key Engineering Materials, 2014, 635: 9-12.
- [4] 庄景云,杜金辉,邓群. 变形高温合金 GH4169 组织与性能[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [5] SONAR T, BALASUBRAMANIAN V, MALARVIZHI S, et al. An overview on welding of Inconel 718 alloy - effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints[J]. Materials Characterization, 2021, 174: 110997.
- [6] 陈启斌. TC4 钛合金真空电子束焊焊接接头组织性能与腐蚀行为研究[J]. 四川冶金, 2020, 43(4): 20-23.
- [7] 燕怒,韩晓琪,余泳华,等. GH4169 镍基高温合金的超高周疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2016, 40(4): 9-12.
- [8] 马文彬,赵子华,骆红云,等. 高温合金 GH738 超高周疲劳行为研究[J]. 金属热处理, 2019, 44(增刊 1): 630-633.
- [9] 傅惠民,殷刚. 确定疲劳极限的极小样本方法[J]. 机械强度, 1999, 21(2): 115-117.

收稿日期: 2021-09-22