

# GH4169 高温合金材料的力学性能实验研究

许磊,雷旭升

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对航空发动机常用的 GH4169 高温合金材料进行实验研究。对 GH4169 进行室温下的静拉伸试验,测得其屈服强度和抗拉强度。对 GH4169 在室温下的缺口件和光滑件进行高周疲劳寿命试验,分别得到其应力寿命曲线,并根据缺口疲劳系数定义和工程实际应用,确定其疲劳缺口系数。

**关键词:**GH4169 高温合金;缺口系数;疲劳寿命

**中图分类号:**TB302.3   **文献标志码:**B   **文章编号:**1671-5276(2021)05-0032-03

## Experimental Study on Mechanical Properties of GH4169 Superalloy

XU Lei, LEI Xusheng

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

**Abstract:** The GH4169 superalloy material commonly used in aeroengine was studied. The static tensile test of GH4169 at room temperature was carried out, and the yield strength and tensile strength were measured. High cycle fatigue life tests were carried out on notched and smooth GH4169 specimens at room temperature, and the stress life curves were obtained respectively. According to the definition of notch fatigue coefficient and engineering application, the fatigue notch coefficient was determined.

**Keywords:** GH4169 superalloy; notch factor; fatigue life

## 0 引言

由于 GH4169 高温合金材料具有良好的抗疲劳、耐腐蚀性能以及良好的加工性能、焊接性能和组织稳定性<sup>[1-2]</sup>,其在航空工业中的应用比较广泛,在航空发动机中大量地被用于制造各种静止件和转动件,如盘件、机匣、轴、叶片等<sup>[3]</sup>。

当发动机工作时,高速旋转的叶片会吸入硬物杂质。这些杂质会对叶片等旋转结构造成小损伤,表现在宏观上即为机械缺陷,如缺口和凹坑等,这样会导致局部应力集中,实际工作中会引起航空发动机部件的疲劳破坏,表现

为叶片等结构的高周疲劳失效<sup>[4-5]</sup>。能准确地找到这些疲劳损伤,并预测发动机寿命,具有重要的实际应用价值。由于 GH4169 的成分复杂,因此采用实验法研究 GH4169 高温合金及其缺口疲劳性能具有重要的工程意义<sup>[6-7]</sup>。

## 1 GH4169 高温合金静拉伸试样制备

该试验材料由上海某公司提供。材料质量分数如表 1 所示。参考国标 GB228 金属材料室温拉伸试验方法制备了 GH4169 高温合金静拉伸试验件如图 1 所示。试验件尺寸如图 2 所示。静拉伸试验件厚度为 2.8 mm。

表 1 GH4169 高温合金质量分数

C	Cr	Ni	Nb	Mo	Al	Ti	Fe	Ta
0.015~0.060	17.0~21.0	50.00~55.00	5.0~5.50	2.80~3.30	0.30~0.70	0.75~1.15	余	≤0.10
Co	Mn	Si	S	P	Mg	B	Cu	Ca
≤1.00	≤0.35	≤0.35	≤0.002 0	≤0.015	≤0.005	≤0.006	≤0.30	≤0.005
Pb	Sn	Se	Bi	Ag	Te	Tl	O	N
≤0.000 5	≤0.005	≤0.000 3	≤0.000 03	≤0.000 5	≤0.000 05	≤0.000 1	≤0.005	≤0.01

第一作者简介:许磊(1993—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,研究方向为航空发动机结构强度。



图 1 GH4169 静拉伸试样

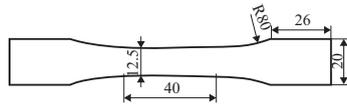


图 2 试验件尺寸图

## 2 静拉伸结果

本实验使用的液压伺服材料试验机型号为 MTS793, 整套试验设备如图 3 所示。主要包括载荷框架、控制器及 ups 电源、水冷控制系统界面以及液压油源等。



图 3 拉伸试验机

为了得到 GH4169 高温合金应力-应变曲线,进而得到材料的屈服强度和抗拉强度,共对 GH4169 高温合金进行了两次重复性静拉伸试验。拉伸结果如图 4 所示。从图中可以看出两根试验件的应力-应变曲线重复性较好,这说明材料静拉伸性能稳定,试验数据真实有效。

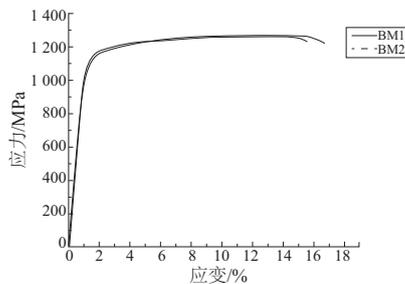


图 4 GH4169 静拉伸应力-应变曲线

拉伸后的断裂结果如图 5 所示。断裂位置在试验件中部,有颈缩现象,试验有效。



图 5 静拉伸断裂结果

由实验所得到的 GH4169 静拉伸材料特性如表 2 所示。这个数据结果可以为 GH4169 疲劳寿命试验奠定基础。

表 2 静拉伸结果

名称	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa
BM-1	1 276.00	1 135.94
BM-2	1 274.43	1 141.99
均值	1 275.22	1 138.97

## 3 疲劳试验及结果

在静拉伸试验基础上进行 GH4169 高温合金光滑件和缺口件的疲劳寿命试验。对光滑试验件加载级分别为抗拉强度的 55%、60%、64%、70% 和 75%,共 5 个等级,对应应力分别为 701.25 MPa、765 MPa、817.7 MPa、892.5 MPa 和 956.25 MPa。以名义应力对缺口件进行加载。加载的总名义应力为 547.21 MPa。加载级别为总名义应力的 60%、70% 和 81%。对应的加载应力分别为 328.3 MPa、383.0 MPa 和 443.2 MPa,应力比为 0.1,波形为正弦波,加载频率为 10 Hz。试验时按设定的循环载荷加载,直至试件断裂,记录每个试验件的疲劳寿命。

图 6 为 GH4169 高温合金光滑件及其断裂位置。图 7 为 GH4169 缺口件及其断裂位置。可以看出,断裂位置在光滑试验件平行段和缺口试验件缺口处。证明数据有效。

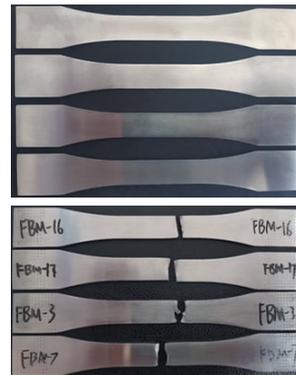


图 6 GH4169 光滑件断裂结果

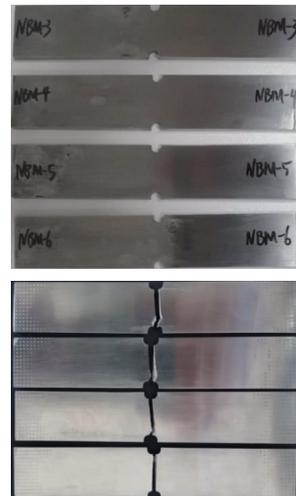


图 7 GH4169 缺口件断裂结果

表3和表4分别列出了GH4169光滑件和GH4169缺口件疲劳断裂数据。随着应力增加,试验件疲劳寿命减小。同一载荷级下,疲劳寿命具有分散性。

表3 GH4169 光滑件数据

试件编号	载荷级/%	载荷/kN	寿命/周期	寿命均值/周期
FBM-3		20.49	211 527	
FBM-8		20.95	163 268	
FBM-10	55	20.71	161 531	190 616
FBM-13		20.82	191 353	
FBM-17		20.33	225 399	
FBM-6		22.83	170 818	
FBM-12		22.81	106 121	
FBM-16	60	22.95	97 558	123 683
FBM-14		22.91	120 233	
FBM-1		23.97	118 553	
FBM-2	64	23.81	98 775	106 999
FBM-15		24.62	103 668	
FBM-5		26.81	127 364	
FBM-7	70	26.39	75 926	97 361
FBM-9		26.61	88 792	
FBM-11	75	27.69	63 926	63 722
FBM-4		27.81	63 517	

表4 GH4169 缺口件数据

试件编号	载荷级/%	载荷/kN	寿命/周期	寿命均值/周期
NBM-2		13.4	391 999	
NBM-5	60	13.3	338 275	336 489
NBM-6		13.5	279 192	
NBM-1		15.3	133 629	
NBM-4	70	14.8	124 347	129 015
NBM-7		15.2	129 070	
NBM-3		14.1	65 113	
NBM-8	81	14.6	73 994	74 440
NBM-9		15.0	84 212	

所选取的载荷范围内,疲劳试验件的疲劳寿命都集中在 $10^4 \sim 10^6$ 之间,处于中长寿范围内。通过拟合,分别得到光滑件和缺口件的应力-寿命曲线如图8和图9所示。从图中可以看出,在寿命相同情况下,光滑件的应力大于缺口件应力。

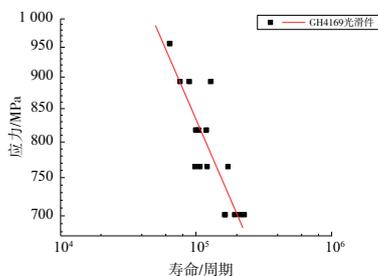


图8 GH4169 光滑件应力-寿命曲线

根据拟合结果,得到GH4169高温合金光滑件应力-寿命方程为

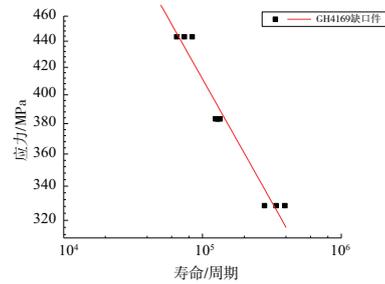


图9 GH4169 缺口件应力-寿命曲线

$$\lg \sigma = 4.157 - 0.247 \lg N_f \quad (1)$$

根据拟合结果,得到GH4169高温合金缺口件应力-寿命方程为

$$\lg \sigma = 3.566 - 0.190 \lg N_f \quad (2)$$

根据缺口疲劳系数定义, $K_f$ 定义式为

$$K_f = S_f / S_r$$

式中: $S_f$ 为光滑件疲劳极限; $S_r$ 为缺口件疲劳极限。

缺口疲劳系数是 $>1$ 的。缺口疲劳系数越大,疲劳寿命越短。对于本次研究,试验寿命选取范围为 $10^4 \sim 10^6$ ,所以选取寿命为 $10^6$ 对应的应力为本次研究的疲劳极限。代入式(1)求得光滑件的极限强度为473 MPa。代入式(2)得到缺口件极限强度为267 MPa。所以缺口系数为1.772。

## 4 结语

通过本次实验研究,可以总结如下几点:

1) 本文设计GH4169高温合金静拉伸试验件,当试验件受到拉伸载荷作用时,试验件中心发生局部颈缩屈服,随着载荷继续增大,屈服区域逐渐扩大,最后从颈缩部位开始出现裂纹直至断裂,但是总体颈缩现象不太明显。通过试验数据获得接头的抗拉强度约为1 275 MPa。

2) 本文在GH4169高温合金静强度试验的基础上,开展了GH4169高温合金光滑件和缺口件的疲劳性能研究,建立了应力比 $R=0.1$ 下的应力-寿命曲线。

3) 通过对光滑件应力寿命方程和缺口应力寿命方程比较、计算,得出了高温合金缺口疲劳系数 $K_f=1.772$ 。

### 参考文献:

- [1] BELAN J. The fractography analysis of IN 718 alloy after fatigue test[J]. Key Engineering Materials, 2014, 635: 9-12.
- [2] 薄鑫涛. GH4169 合金的介绍[J]. 热处理, 2018, 33(4): 47.
- [3] 李彤. 69111、GH4169 材料的研究与应用[J]. 科技资讯, 2010, 8(6): 39-40.
- [4] KONEČNÁ R, NICOLETTO G, RIVA E. Notch fatigue behavior of Inconel 718 produced by selective laser melting[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17: 138-145.
- [5] 李德勇, 姚卫星. 缺口件振动疲劳寿命分析的名义应力法[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2036-2041.
- [6] 万宏强, 高刚, 丁锋. 基于贝叶斯评估的航空发动机涡轮盘疲劳寿命可靠性研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(5): 13-15.
- [7] 杜兆伟. 镍基高温合金 GH4169 电解-磁力复合研磨加工试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.

收稿日期: 2020-10-09