

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.257

引用格式:赵翰博, 张建宇, 刘浩, 等. Ti60 合金疲劳蠕变交互作用下蠕变应力门槛值预测[J]. 重庆大学学报, 2025,48(4): 29-39.



Ti60 合金疲劳蠕变交互作用下蠕变应力门槛值预测

赵翰博, 张建宇, 刘浩, 龚愉

(重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要: 在 550 °C 高温环境下, 对 Ti60 合金试件开展疲劳-蠕变交互试验, 在疲劳应力 $\sigma_{\max} = 450$ MPa、应力比 $R=0.1$ 的试验条件下, 研究不同蠕变应力对钛合金疲劳蠕变行为的影响。根据试验数据, 基于 Norton 模型提出一种能在样本有限的情况下, 仅通过短时间的试验来预测较长时间的蠕变应力门槛值的预测模型。将该模型预测结果与最大轴向应力法计算结果进行对比, 并将两者预测结果均与升降法所得试验结果进行了对比, 相对误差均在 2% 以内, 表明该预测模型能较为准确地预测疲劳蠕变试验条件下蠕变应力门槛值。

关键词: Ti60 合金; 疲劳-蠕变; 蠕变应力门槛值; 蠕变应力预测模型

中图分类号: V252

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)04-029-11

Prediction of threshold value of creep stress in Ti60 alloy under fatigue-creep interaction

ZHAO Hanbo, ZHANG Jianyu, LIU Hao, GONG Yu

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Fatigue-creep interaction tests were conducted on Ti60 alloy specimens at 550 °C. Under test conditions of maximum fatigue stress $\sigma_{\max} = 450$ MPa and stress ratio $R=0.1$, the influence of different creep stresses on the fatigue-creep behavior of the alloy was investigated. Based on the test data and the Norton model, a novel method was proposed to improve the understanding of fatigue-creep behavior with a limited number of samples. This approach establishes a prediction model capable of estimating the threshold value of creep stress over extended periods through short-term experimental data. The model's predictions were compared with results from the maximum axial stress method and the step-loading method, yielding a relative error of less than 2%. The results show that the proposed prediction model can accurately determine the creep stress threshold under fatigue-creep interaction conditions.

Keywords: Ti60 alloy; fatigue-creep interaction; creep stress threshold; stress prediction model

收稿日期: 2023-12-09 网络出版日期: 2024-05-07

作者简介: 赵翰博(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事钛合金疲劳-蠕变性能方向的研究, (E-mail) hanbo970115@163.com。

通信作者: 刘浩(1980—), 男, 博士, 高级实验师, (E-mail) liuhaocqu@cqu.edu.cn。

近年来随着航空航天技术的不断发展,航空飞行器的速度取得了重大突破,更高飞行速度的服役环境对飞机结构材料的要求也随之增加。超音速飞机在高速飞行情况下会产生大量的热,并且在短时间内无法及时有效地散热,同时伴随着机械载荷,在此种工况下,传统的铝合金已经无法满足高温环境下强度需要,而高温钛合金因其耐腐蚀、耐高温等特点^[1-3]被用于机身上温度较高、载荷较大、工况较恶劣的构件中,在此环境中构件会受到蠕变、疲劳及二者交互作用影响,这严重影响其服役寿命;而疲劳蠕变二者交互作用可能会比单独的疲劳或蠕变作用造成更大的损伤^[4-6],因此高温环境下金属的疲劳、蠕变及二者的交互效应研究一直是理论和工程研究的关注重点^[7]。

对疲劳蠕变交互作用的研究,目前主要基于损伤力学和断裂力学理论,通过损伤参量和损伤累积研究材料的失效机理以及裂纹萌生寿命^[8]。目前疲劳蠕变寿命的预测方法可分为三大类^[9],即基于 Manson-Coffin 方程发展的方法、基于应变区分的方法(strain range partitioning, SRP),以及基于线性损伤累积准则的方法^[10-13]。按照试验加载方式,可分为应变控制试验和应力控制试验^[14],Saad 等^[15]对 P91 合金进行应变控疲劳蠕变试验,得出该材料疲劳蠕变分为非线性软化、软化平稳及裂纹快速扩展至断裂的 3 个阶段,Cristalli 等^[16]认为疲劳蠕变是一种蠕变损伤增强疲劳损伤的机制,加剧了循环软化效应,导致疲劳蠕变寿命缩短。魏峰^[17]、郝玉龙^[18]和刘洪杰^[19]对应力控试验条件进行了研究,发现交互作用中,蠕变损伤有时会被疲劳损伤抑制;在应力控制的试验模式下,Xu 等^[20]基于 Narasimhachary 等^[21]的试验结果,建立了疲劳蠕变损伤模型,认为随着保载时间的延长,蠕变损伤在总损伤中比例增大。学者对高温下合金疲劳蠕变交互寿命预测开展了大量研究,但对材料疲劳-蠕变交互作用的影响因素研究较少,Zhang 等^[22]研究表明,不同试验条件下影响 FGH97 高温疲劳蠕变失效的主要因素不同,并分析了与应力水平和保载时间相关的损伤发展主导因素;Liu 等^[23-24]研究了 FGH97 在不同温度下疲劳蠕变交互试验中的主要失效因素,发现蠕变效应发挥作用存在一个温度阈值,在该阈值温度之下可忽略蠕变效应。大量的研究表明,疲劳-蠕变试验中,蠕变损伤与疲劳损伤之间存在非常复杂的关系,然而,不管是相互竞争、相互促进还是相互抑制,均是在特定的试验条件之下,因此,也可能存在可忽略蠕变效应的阈值应力。鉴于此,笔者通过在 550 °C 下对 Ti60 合金试件进行疲劳蠕变试验,探究疲劳蠕变试验中不同蠕变应力的影响,以应变量 1% 为判据判断其是否发生蠕变效应,得出疲劳蠕变试验中蠕变应力阈值的预测模型,并结合升降法^[25]试验结果进行验证。

1 疲劳蠕变试验方案

疲劳-蠕变试验采用图 1 所示 Ti60 合金增材制造试验件,根据《金属材料 蠕变-疲劳试验方法》(GB/T 38822—2020)^[26],在 INSTRON 8801 疲劳试验机上进行。试件与试验机通过销钉连接,试验时保证加载装置与试件有良好的对中性,试验温度为 550 °C,通过高温炉对试件进行加热,试验前保温 30 min 确保试件温度分布均匀。采用应力控制,试件的应变由高温引伸计测得,根据飞机的飞-续-飞载荷工况,飞机构件将承受疲劳-蠕变载荷,设计试验加载波形如图 2 所示。

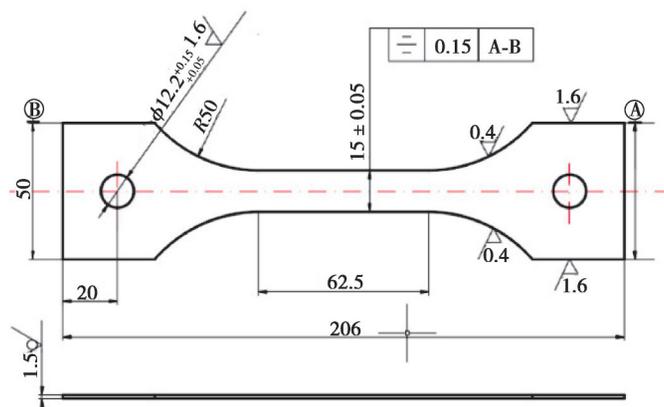


图 1 疲劳蠕变试件示意图

Fig. 1 Fatigue creep specimen

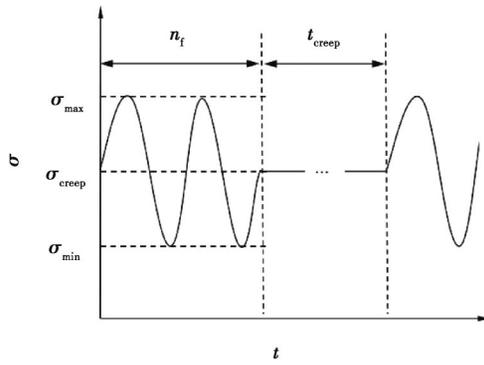


图 2 疲劳蠕变试验波形示意图

Fig. 2 Waveform of fatigue creep test

图 2 中, σ_{max} 与 σ_{min} 为疲劳载荷的峰值与谷值, σ_{creep} 为蠕变应力, n_f 为疲劳载荷循环数, t_{creep} 为蠕变保载时间。本试验中, 保持疲劳载荷的最大应力水平为 450 MPa 以及应力比 $R=0.1$ 不变, 在环境温度 550 °C 下研究蠕变应力对试件疲劳蠕变的影响。为模拟高速飞行器薄壁结构的实际工况, 由循环载荷与蠕变保载组成块谱, 如图 2 所示, 循环加载 $n_f=64$ 次, 频率为 5 Hz, 每一块谱中保载时间 $t_{creep}=2\ 880$ s。

2 试验结果

以 550 °C 下疲劳最大应力水平 $\sigma_{max}=450$ MPa、蠕变应力 $\sigma_{creep}=450$ MPa 为例, 试验结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 疲劳蠕变试验所得应变-时间曲线与纯蠕变试验中的蠕变曲线相似, 其应变-时间关系有明显的 3 个阶段, 即应变速率由快变慢的第 1 阶段; 应变速率基本保持不变的线性增长第 2 阶段以及应变速率持续增加直至破坏的第 3 阶段。此外, 不同蠕变应力、蠕变时长为 50 h 和 100 h 的蠕变应变-时间曲线如图 4 和图 5 所示。

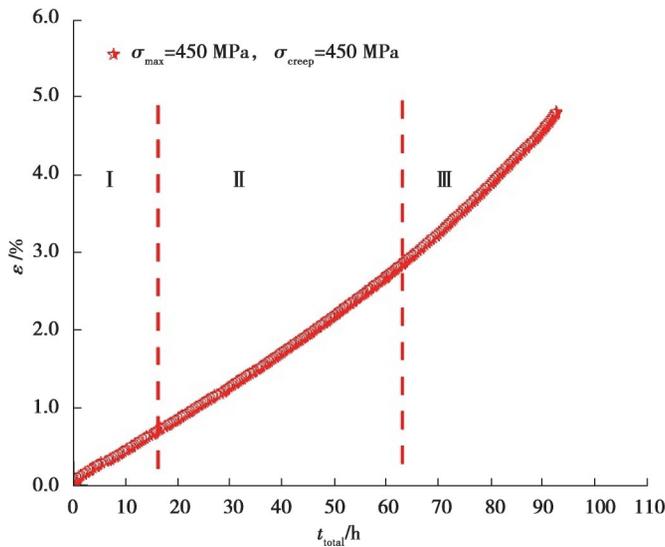


图 3 550 °C, $\sigma_{max}=450$ MPa, $\sigma_{creep}=450$ MPa 时的应变-时间曲线

Fig. 3 Strain-time curve at 550 °C, $\sigma_{max}=450$ MPa and $\sigma_{creep}=450$ MPa

从图 4 中可以看出, 当蠕变时长为 50 h, 蠕变应力不高于 390 MPa 情况下的应变速率基本一致; 蠕变应力高于 405 MPa 时, 应变速率随蠕变应力增加而增大。据此推断, 蠕变应力在 390 ~ 405 MPa 之间可能存在一个影响应变速率改变的转折点。

从图 5 中可以看到, Ti60 合金在 550 °C、蠕变应力为 450 MPa、蠕变时长 100 h 时的应变率在 6% 以内, 蠕

变第2阶段应变速率基本不变、第3阶段应变速率缓慢稳定增长,与9%~12%Cr、1.25Cr0.5Mo等合金材料相关试验^[27-30]相比,应变速率增长较缓慢,表明Ti60材料蠕变性能良好。

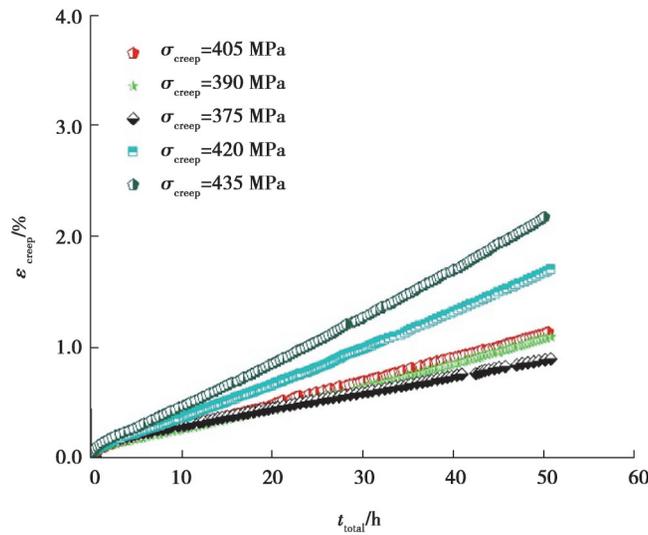


图4 疲劳-蠕变应变-时间曲线(试验时长50 h,疲劳载荷 $\sigma_{\max}=450$ MPa)

Fig. 4 Strain-time curve in fatigue-creep test(test duration 50 h and fatigue load $\sigma_{\max}=450$ MPa)

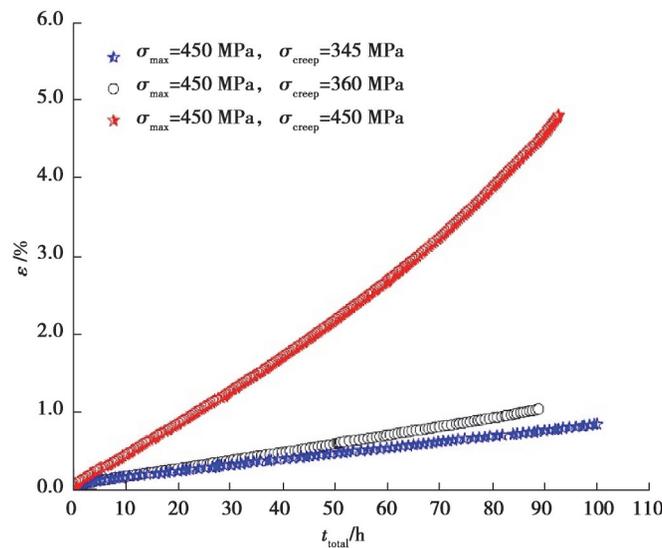


图5 疲劳-蠕变应变-时间曲线(100 h)

Fig. 5 Strain-time curve in fatigue-creep test(100 h)

3 蠕变应力门槛值预测模型

3.1 基于最大轴向应力预测模型

2009年陈学东等^[31]在延性耗竭理论及损伤力学有效应力基础上提出最大轴向应力寿命预测模型,其表达式如式(1)所示。

$$N_{c-f} = C \sigma_{N_{\max}}^m, \quad (1)$$

式中: N_{c-f} 为疲劳蠕变寿命; C 和 m 为材料常数; $\sigma_{N_{\max}}$ 为最大轴向应力。

在等温(给定的相同温度)及相同保载时间的试验条件下,利用式(1)得出基于最大轴向应力的蠕变应力门槛值预测模型,如式(2)所示。

$$\sigma_{creep} = C_1 t_{c-f}^{m_1}, \tag{2}$$

式中： σ_{creep} 为蠕变应力； t_{c-f} 为试验时长，单位为 h； C_1 和 m_1 为材料参数。

应用式(2)对蠕变应力门槛值的预测步骤如图 6 所示。

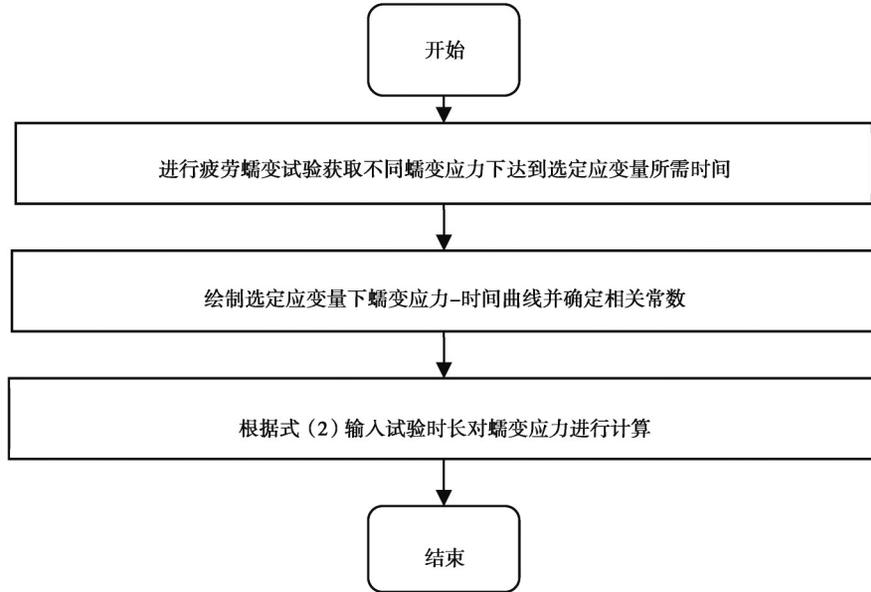


图 6 基于最大轴向应力计算蠕变应力流程图

Fig. 6 Flow chart of creep stress calculation based on maximum axial stress model

按照上述流程，计算达到不同应变变量下，进行 50 h 试验的蠕变应力门槛值的各材料参数(见表 1)，计算结果如表 2 所示。

表 1 基于最大轴向应力模型各材料参数

Table 1 Material parameter based on the maximum axial stress model

应变变量/%	C_1	m_1
0.3	580.764	-0.155
0.4	616.595	-0.156
0.5	639.735	-0.155
0.6	662.217	-0.153
0.7	682.339	-0.156
0.8	695.024	-0.154
1.0	721.107	-0.155

表 2 基于最大轴向应力蠕变应力门槛值计算结果

Table 2 Creep stress threshold value based on the the maximum axial stress

应变变量/%	蠕变应力门槛值/MPa
0.3	316.71
0.4	334.00
0.5	349.50
0.6	363.96
0.7	370.65
0.8	380.50
1.0	393.24

3.2 基于平均应变速率预测模型

3.1节所提到的预测模型步骤较复杂,计算不同应变量下的门槛值时均需要重新通过试验数据确定相关参数。下面以平均应变速率为依据,提出步骤更为简洁的蠕变应力门槛值预测模型。

试验中观察到无论试验时长为50 h或100 h,蠕变曲线第2阶段的线性应变增加速率随蠕变应力 σ_{creep} 的变化而改变,且随着蠕变应力 σ_{creep} 的增加,蠕变应变速率也随之增加,二者具有明显正相关性,在实际应用中,蠕变第1阶段与第3阶段时间占比小,应变速率变化快且不稳定,而蠕变第2阶段在整个蠕变过程中时间占比较大,速率稳定,且不同的 σ_{creep} 对应的应变速率有明显差异,根据疲劳蠕变过程中不同蠕变应力 σ_{creep} 对应的平均应变变化率提出疲劳蠕变试验中蠕变应力门槛值的预测模型。

根据目前试验所得数据,不同蠕变应力下试验的应变速率不同,且随着蠕变应力的增大,蠕变速率也随之增加,故基于Norton模型^[32]提出。

$$\sigma_{\text{creep}} = b_1 \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^{c_1}, \quad (3)$$

式中: t 为疲劳-蠕变试验时长; σ_{creep} 为蠕变应力; b_1 和 c_1 为拟合参数,在双对数坐标系下进行线性拟合确定。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon_d}{t_d} \quad (4)$$

在式(3)运用时,假设应变速率与设计达到应变 ε_d 和设计寿命 t_d 有式(4)所示关系,将式(4)带入式(3)中可得

$$\sigma_d = b_1 \left(\frac{\varepsilon_d}{t_d} \right)^{c_1}, \quad (5)$$

$$t_d = \frac{\varepsilon_d}{\left(\frac{\sigma_d}{b_1} \right)^{\frac{1}{c_1}}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_d = t_d \cdot \left(\frac{\sigma_d}{b_1} \right)^{\frac{1}{c_1}}, \quad (7)$$

式中, σ_d 为蠕变应力门槛值。以式(5)模型为依据,通过试验验证其疲劳-蠕变过程中,蠕变应力 σ_{creep} 与疲劳-蠕变时长 t 的关系,具体流程如图7所示。本试验中,蠕变应力 σ_{creep} 与应变速率 $d\varepsilon/dt$ 在双对数坐标下的拟合曲线如图8所示。

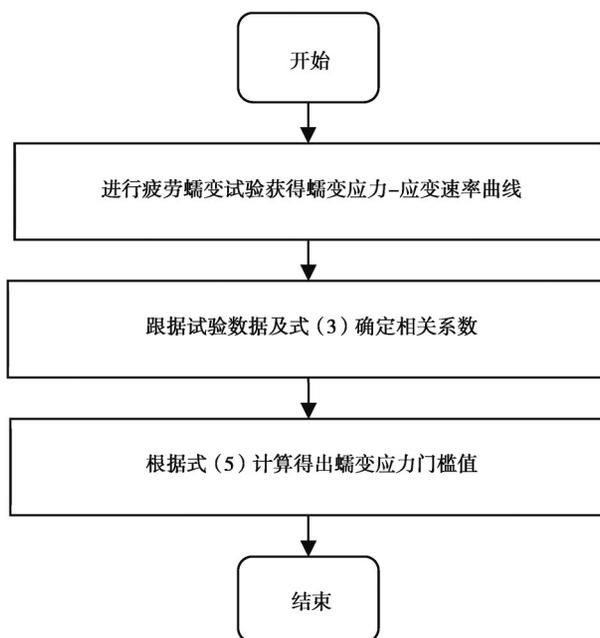


图7 基于平均应变速率计算蠕变应力流程图

Fig. 7 Flow chart of creep stress calculation based on average strain rate model

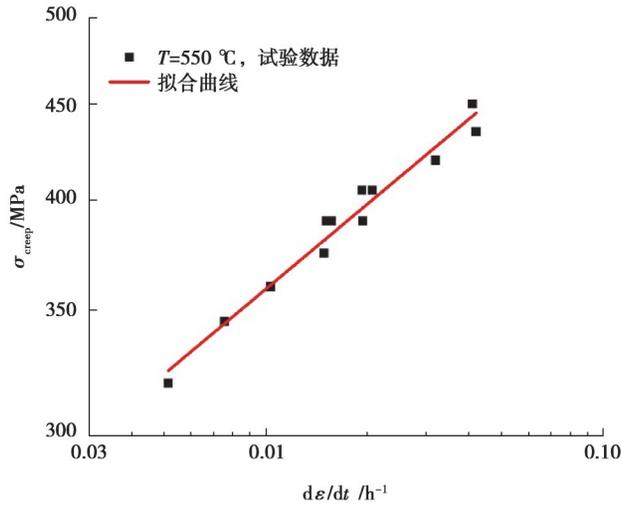


图 8 蠕变应力-应变速率曲线

Fig. 8 Creep stress-strain rate curve

在双对数坐标下,根据式(5)对试验数据进行拟合,可得

$$\sigma_{creep} = 715.863 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{t}\right)^{0.14995} \quad (8)$$

根据式(8)计算不同应变量下,进行 50 h 试验的蠕变应力门槛值,结果如表 3 所示。

表 3 基于平均应变速率蠕变应力门槛值计算结果

Table 3 Creep stress threshold value based on average strain rate model

应变量/%	蠕变应力门槛值/MPa
0.3	332.40
0.4	347.06
0.5	358.86
0.6	368.81
0.7	377.43
0.8	385.07
1.0	398.17

3.3 模型预测与试验结果对比

为验证 3.1 和 3.2 节中模型的有效性,用升降法^[33]测得 550 °C 下,疲劳最大应力水平为 450 MPa,经历试验时间为 50 h 和 100 h,使试件应变达到 1% 的蠕变应力 σ_{creep} ,用试验实际测得的 2 组蠕变应力 σ_{creep} 与式(3)及式(8)所得结果进行对比,验证其准确性和有效性。50 h 和 100 h 疲劳蠕变试验运用升降法得到的升降图如图 9~10 所示。

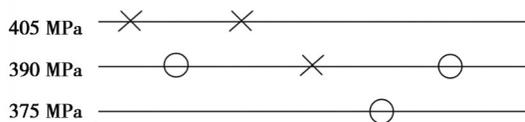


图 9 50 h 疲劳蠕变试验升降图

Fig. 9 Up-down method of fatigue-creep test in 50 h

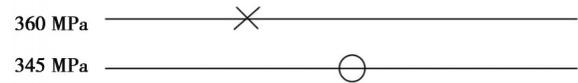


图 10 100 h 疲劳蠕变试验升降图

Fig. 10 Up-down method of fatigue-creep test in 100 h

图中,“×”表示经过试验时长后试件应变达到1%的数据,“○”表示经过试验时长,试件应变未达到1%的数据,根据2组升降图可确定试验时长50 h和100 h,疲劳最大应力水平450 MPa,应变达到1%的蠕变应力 σ_{creep} 为

$$\sigma_{\text{creep}50} = \frac{405 \times 2 + 390 \times 3 + 375}{6} = 392.5 \text{ MPa}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{creep}100} = \frac{360 + 345}{2} = 352.5 \text{ MPa}。 \quad (10)$$

运用3.1节方法计算所得50 h应变达到1%的蠕变应力为

$$\sigma_{\text{creep}} = 10^{2.858} (50)^{-0.155} = 393.24 \text{ MPa}。 \quad (11)$$

运用3.2节方法计算所得50 h与100 h应变达到1%的蠕变应力为

$$\sigma_{\text{creep}} = 715.863 \cdot 1 \left(\frac{1}{50} \right)^{0.14995} = 398.17 \text{ MPa}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{creep}} = 715.863 \cdot 1 \left(\frac{1}{100} \right)^{0.14995} = 358.86 \text{ MPa}。 \quad (13)$$

试验结果与模型预测结果对比及误差如表4所示。

表4 蠕变应力试验值与预测值对比

Table 4 Comparison of creep stress test values with predicted values

模型	试验时长/h	达到应变量/%	预测蠕变应力/MPa	试验蠕变应力/MPa	误差/%
基于最大轴向应力模型	50	1.00	393.24	392.50	0.19
	50	1.00	398.17	392.50	1.45
基于平均应变速率模型	100	1.00	358.86	352.50	1.82

由表4可知,基于最大轴向应力预测模型与本文所提出的模型均有良好的预测效果,但是基于最大轴向应力预测模型在预测蠕变门槛应力时由于其所需的试验数据较多,无法预测本文中蠕变时长为100 h的蠕变门槛应力。

按照3.1和3.2节的2种预测蠕变应力门槛值的模型,计算不同应变变量下试验时长50 h的蠕变应力门槛值,结果对比如表5所示。

表5 蠕变应力门槛值预测值对比

Table 5 Comparison of predicted values between the two models

应变变量 ε /%	基于最大轴向应力计算蠕变应力门槛值/MPa	基于平均应变速率计算蠕变应力门槛值/MPa
0.3	316.71	332.40
0.4	334.00	347.06
0.5	349.50	358.86
0.6	363.96	368.81
0.7	370.65	377.43
0.8	380.50	385.07
1.0	393.24	398.17

从图11中可以看出,应用3.2节所提出模型计算结果与3.1节模型结果相一致。由表5可知,随着试验应变变量的增加,2种模型的相对误差逐渐减小,计算应变变量较大的情况二者计算结果趋于一致。应用3.1节的最大轴向应力模型计算蠕变应力门槛值时,需要大量的数据来确定参数,且如需计算不同应变变量下对应的蠕变应力

门槛值时,需重新确认公式中的常数,计算量较大;而3.2节的基于平均应变速率模型仅需对试验数据进行一次参数确定即可获得不同应变率下的蠕变应力门槛值,且能保证预测的准确性,减少大量计算。

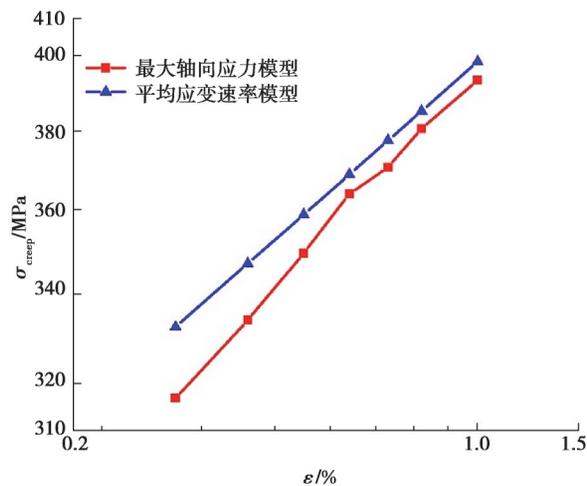


图11 2种模型蠕变应力门槛值计算结果对比

Fig. 11 Comparison of calculation results of creep stress threshold values of two models

4 结论

1) Ti60合金在550℃下进行疲劳蠕变试验结果显示,在试验过程中,试件有明显的蠕变损伤过程,即第1阶段应变速率由快变慢,第2阶段应变速率保持不变,以及应变速率持续增加的第3阶段;以图3的疲劳最大应力450 MPa和蠕变应力450 MPa为例,虽然应变-时间曲线有明显的蠕变3个阶段,但第1阶段持续时间短,所占比重较小;第2阶段所占比重较大且应变速率稳定;虽然有明显的第3阶段,但在第3阶段中,与其他材料的疲劳蠕变试验不同,应变速率增长比较缓慢,在6%应变以内无应变快速增加直至断裂现象,说明Ti60合金具有良好且稳定的蠕变性能。

2) 当固定试验温度、疲劳-蠕变试验中的疲劳载荷、保载时间等因素时,材料的应变速率随着蠕变应力的不同而不同,且蠕变应力越大,应变速率越大。根据此现象提出的疲劳蠕变预测模型的操作简单,精度较高。

3) 所提出蠕变应力门槛值的预测模型仅仅考虑蠕变应力单个因素的影响,但金属在高温环境下的疲劳蠕变交互作用影响因素十分复杂,从试验结果看,疲劳和蠕变2种失效形式存在明显的交互作用,未来的研究可以不仅仅局限于蠕变应力的影响,也将疲劳失效考虑其中,使得疲劳蠕变预测模型体系更加完善、准确。

参考文献

- [1] 李欣,赵军,刘时兵,等.航空用高温钛合金的研究进展[C]//2020中国铸造活动周论文集.合肥:中国机械工程学会铸造分会,铸造行业生产力促进中心,2020:109-113.
Li X, Zhao J, Liu S B, et al. Research progress of high temperature titanium alloys for aviation[C]//2020 China Foundry Congress. Hefei: Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society, Foundry Productivity Promotion Center, 2020: 109-113. (in Chinese)
- [2] 何春艳,张利军.国内外高温钛合金的发展与应用[J].世界有色金属,2016(1):21-25.
He C Y, Zhang L J. The development and application of high temperature titanium alloy at domestic and abroad[J]. World Nonferrous Metals, 2016(1): 21-25. (in Chinese)
- [3] 张鸿渐.高温钛合金的发展与应用[J].技术与市场,2015,22(12):208.
Zhang H J. Development and application of high temperature titanium alloy[J]. Technology and Market, 2015, 22(12): 208. (in Chinese)
- [4] 涂善东.高温结构完整性原理[M].北京:科学出版社,2003.

- Tu S D. High temperature structural integrity[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 张俊善. 材料的高温变形与断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhang J S. Deformation and fracture of materials at high temperature[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [6] Viswanathan R, Stringer J. Failure mechanisms of high temperature components in power plants[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2000, 122(3): 246-255.
- [7] 龚伟忠. 316H不锈钢缺口蠕变-疲劳行为及其寿命预测方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
Gong W Z. Research on notch creep-fatigue behavior and life prediction method of 316H stainless steel[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [8] 王润梓, 廖鼎, 张显程, 等. 高温结构蠕变疲劳寿命设计方法: 从材料到结构[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(16): 66-86, 105.
Wang R Z, Liao D, Zhang X C, et al. Creep-fatigue life design methods in high-temperature structures: from materials to components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(16): 66-86, 105. (in Chinese)
- [9] 王润梓. 基于能量密度耗散准则的蠕变-疲劳寿命预测模型及应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
Wang R Z. A creep-fatigue life prediction model based on strain energy density exhaustion criterion and its application on aero-engine turbine discs[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] Zhang S D, Takahashi Y. Creep-fatigue life and damage evaluation under various strain waveforms for Ni-based Alloy 740H[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107833.
- [11] Takazawa S, Kang J, Abe M, et al. Demonstration of single-frame coherent X-ray diffraction imaging using triangular aperture: towards dynamic nanoimaging of extended objects[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 14394.
- [12] Takahashi Y. Modelling of rupture ductility of metallic materials for wide ranges of temperatures and loading conditions, part I: development of basic model[J]. *Materials at High Temperatures*, 2020, 37(6): 357-369.
- [13] Takahashi Y. Modelling of rupture ductility of metallic materials over wide ranges of temperatures and loading conditions, part II: comparison with strain energy-based approach[J]. *Materials at High Temperatures*, 2020, 37(5): 340-350.
- [14] 王家璇, 李梦阳, 郑泽邦. 蠕变-疲劳交互作用下 P91 钢变形行为的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(9): 1-7.
Wang J X, Li M Y, Zheng Z B. Advances in deformation behaviour of P91 steel under creep-fatigue interaction[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(9): 1-7. (in Chinese)
- [15] Saad A A, Bachok Z, Sun W. A study on the damage evolution of P91 steel under cyclic loading at high temperature[J]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2016, 13(3): 3564-3573.
- [16] Cristalli C, Agostini P, Bernardi D, et al. Low cycle fatigue, creep-fatigue and relaxation-fatigue tests on P91[J]. *Journal of Physical Science and Application*, 2017, 7(2): 18-26.
- [17] 魏峰. P91 钢蠕变-疲劳交互作用损伤模型研究及寿命评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
Wei F. Research on creep-fatigue interaction damage model and life assessments of P91 steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [18] 郝玉龙. P91 钢蠕变特性及蠕变疲劳交互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
Hao Y L. Study on creep and creep-fatigue interaction of P91 steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [19] 刘洪杰. 电站锅炉用 P91 钢蠕变/疲劳交互作用的试验研究[J]. *动力工程*, 2007, 27(6): 990-995.
Liu H J. Experimental study on creep-fatigue interaction behavior of steel P91 for power plant boilers[J]. *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(6): 990-995. (in Chinese)
- [20] Xu L, Zhao L, Gao Z, et al. A novel creep-fatigue interaction damage model with the stress effect to simulate the creep-fatigue crack growth behavior[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 130: 143-153.
- [21] Narasimhachary S B, Saxena A. Results of the ASTM round robin on creep-fatigue crack growth testing of a P91 steel[J]. *Materials Performance and Characterization*, 2019, 8(1): 20190125.
- [22] Zhang M, Zhang Y X, Liu H, et al. Judgment criterion of the dominant factor of creep-fatigue crack growth in a nickel-based superalloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 118: 176-184.
- [23] Liu H, Bao R, Fei B J. Determination of creep crack growth threshold by experiments under elevated temperature with pre-stressed specimens[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 891/892: 371-376.
- [24] Liu H, Bao R, Lei W M, et al. Evaluating the critical temperature of creep-fatigue interaction a nickel-based powder metallurgy

- superalloy[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 577/578: 625-628.
- [25] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Li S M. *Mechanical fatigue and reliability design*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 蠕变-疲劳试验方法: GB/T 38822—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. *Metallic materials: creep fatigue test method: GB/T 38822—2020*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [27] Liu Z, Gong J G, Zhao P, et al. Creep-fatigue interaction and damage behavior in 9-12%Cr steel under stress-controlled cycling at elevated temperature: effects of holding time and loading rate[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 156: 106684.
- [28] Takahashi Y. Study on creep-fatigue evaluation procedures for high chromium steels: part II: sensitivity to calculated deformation[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(6): 423-440.
- [29] Dong C L, Yu H C, Jiao Z H, et al. Low cycle fatigue, creep and creep-fatigue interaction behavior of a TiAl alloy at high temperatures[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 144: 60-63.
- [30] 陈凌, 张贤明, 欧阳平. 一种疲劳-蠕变交互作用寿命预测模型及试验验证[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(10): 1356-1361.
Chen L, Zhang X M, Ouyang P. A model of life prediction for fatigue-creep interaction and its experimental verification[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(10): 1356-1361. (in Chinese)
- [31] 陈学东, 范志超, 江慧丰, 等. 复杂加载条件下压力容器典型用钢疲劳蠕变寿命预测方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 81-87.
Chen X D, Fan Z C, Jiang H F, et al. Creep-fatigue life prediction methods of pressure vessel typical steels under complicated loading conditions[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 81-87. (in Chinese)
- [32] 姜礼益, 宋世杰, 阚前华. T91钢高温蠕变实验和耦合损伤模型研究[J]. *四川轻化工大学学报(自然科学版)*, 2023, 36(1): 1-10.
Jiang L Y, Song S J, Kan Q H. Study on creep experiment and damage-coupled constitutive model of T91 steel at elevated temperature[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 36(1): 1-10. (in Chinese)
- [33] 中国航发北京航空材料研究院, 郭广平, 丁传富. 航空材料力学性能检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Guo G P, Ding C F. *Mechanical testing of Aeronautical Materials*[M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese)

(编辑 郑洁)