

飞行器舱体轻质合金蠕变行为建模与寿命预测

李宏民¹, 唐宇彬^{2*}, 赵鹏飞², 张翔羽², 张生鹏²

(1.北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

2.航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: **目的** 建立飞行器舱体轻质合金蠕变本构模型, 预测其蠕变损伤行为规律及其寿命。**方法** 在蠕变损伤力学模型基础上, 引入由材料蠕变机制确定的稳态蠕变速率模型, 建立改进的蠕变损伤模型; 开展单轴拉伸蠕变试验和材料微观分析, 确定合金蠕变机理; 考虑蠕变机理对合金蠕变速率的影响, 建立相应的无量纲损伤因子, 将其代入改进的蠕变损伤模型, 得到合金的蠕变本构模型。**结果** 根据 ZM6 合金的蠕变试验和材料微观分析结果, 确定 ZM6 合金的蠕变机理为位错滑移, 蠕变损伤类型为晶粒粗化。通过数据拟合的方法确定了 ZM6 合金蠕变本构模型的模型参数, 将 ZM6 合金蠕变本构模型的预测结果与试验结果进行对比, 对稳态蠕变阶段的预测结果误差小于 5%。**结论** 该模型可有效预测飞行器舱体轻质合金蠕变行为规律, 为评估其贮存寿命提供了依据。

关键词: 蠕变; 蠕变损伤; ZM6 合金; 本构模型; 位错滑移; 晶粒粗化; 寿命预测

中图分类号: V416

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0007-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.002

Modeling and Life Prediction of Creep Behavior of Lightweight Alloys for Aircraft Cabin Structures

LI Hongmin¹, TANG Yubin^{2*}, ZHAO Pengfei², ZHANG Xiangyu², ZHANG Shengpeng²

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Aerospace Science and Industry Defense Technology Research and Test Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a creep constitutive model for the lightweight alloy of the aircraft cabin structures to predict the creep damage behavior and its life. Based on the creep damage mechanics model, a steady-state creep rate model determined by the material creep mechanism was introduced to establish an improved creep damage model. Uniaxial tensile creep tests and material microstructure analysis were conducted to determine the creep mechanism of the alloy. Considering the influence of the creep mechanism on the creep rate of the alloy, a dimensionless damage factor was established and substituted into the improved creep damage model to obtain the creep constitutive model of the alloy. According to the creep test and material microstructure analysis results of ZM6 alloy, it was determined that ZM6 alloy had the dislocation slip creep mechanism and grain coarsening creep damage. The model parameters of the ZM6 alloy creep constitutive model were determined by data fit-

收稿日期: 2025-03-28; 修订日期: 2025-05-12

Received: 2025-03-28; Revised: 2025-05-12

基金项目: 技术基础科研项目 (JSHS2022208B001)

Fund: Technical Basic Research Projects(JSHS2022208B001)

引文格式: 李宏民, 唐宇彬, 赵鹏飞, 等. 飞行器舱体轻质合金蠕变行为建模与寿命预测[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 7-12.

LI Hongmin, TANG Yubin, ZHAO Pengfei, et al. Modeling and Life Prediction of Creep Behavior of Lightweight Alloys for Aircraft Cabin Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 7-12.

*通信作者 (Corresponding author)

ting method. The prediction results of the ZM6 alloy creep constitutive model were compared with the test results, and the prediction error of the steady-state creep stage was less than 5%. In conclusion, this model can effectively predict the creep behavior of the lightweight alloy in the aircraft cabin structures, providing a basis for evaluating its storage life.

KEY WORDS: creep; creep damage; ZM6 alloy; constitutive model; dislocation slip; grain coarsening; life prediction

飞行器产品在全寿命周期内,绝大部分时间处于贮存、值班或不工作状态,其在实际使用环境下的贮存寿命与发射飞行可靠度同等重要^[1-7]。飞行器舱体内用于承载的精密结构件大量使用轻质合金材料,如镁合金、铝合金、铝锂合金等,在持续的重力及工作载荷作用下,这些材料即使在常温条件下也会发生蠕变和缓慢变形^[8-13]。蠕变过程虽然速率缓慢,但长时间的蠕变累积会使精密构件的应力随着时间的增加重新分配,往往会因蠕变导致的变形、断裂,影响设备主承载结构件的尺寸稳定性和位置精度等功能,引起飞行器发射前测试故障,甚至轨道偏离等问题,直接导致发射失利或无法命中目标等质量问题或事故。因此,飞行器高精密构件贮存寿命设计分析过程中必须考虑轻质合金的长期蠕变损伤与累积影响,掌握材料的蠕变损伤行为规律,并提前预测其贮存寿命。

当前工程应用中主要采用加速应力试验方法研究金属材料的蠕变行为与变化规律。该方法以宏观蠕变试验为基础,从观测到的宏观蠕变现象和试验数据着手,建立描述蠕变规律的理论,提出本构关系假设,并用以研究蠕变应力-应变关系及寿命预测。王卫永等^[14]通过加速蠕变试验外推获取 Q345 钢等合金常温条件下的蠕变规律,给出了稳态蠕变正弦双曲函数模型。陈晓亚等^[15]研究了高强度镁合金的拉伸蠕变行为,通过加速蠕变试验获取了合金在不同蠕变条件下的稳态蠕变应变-时间曲线。凌小君等^[16]在不同温度下对高温合金 FGH4095 开展了蠕变试验,并基于修正 Θ -projection 法建立了分段蠕变本构模型。徐显强等^[17]对 7050 铝合金进行了不同应力条件下的蠕变试验,并采用人工神经网络和幂律方程构建了其蠕变本构模型。Suzuki 等^[18]研究了镍基合金 625 的蠕变损伤机理,并建立了其蠕变本构模型。在蠕变孔洞的产生、

长大和聚合的过程中,受晶粒粗化、位错滑移等机制的影响^[19-21],分为减速蠕变、稳态蠕变和断裂 3 个阶段。上述研究基于试验数据拟合的经验模型缺乏蠕变损伤机理支撑,导致寿命预测精度低。

连续损伤力学(CDM)模型可通过引入损伤变量,能够表征蠕变过程中材料的硬化、软化以及断裂 3 个阶段的损伤行为,对金属材料蠕变应变和寿命预测更准确。因此,本文基于连续损伤力学(CDM)模型,考虑晶粒粗化、位错滑移等机制的影响,建立轻质合金蠕变本构模型,预测轻质合金蠕变行为规律及蠕变寿命,为高精密构件长期贮存蠕变及贮存寿命仿真提供模型基础。

1 蠕变损伤行为建模

1.1 蠕变损伤机理

对蠕变试验前后的 ZM6 合金进行取样并开展金相分析,得到蠕变前和蠕变后的 ZM6 合金组织特征如图 1 所示。蠕变试验前的 ZM6 合金有两相: α -Mg 相和第二相。 α -Mg 晶粒呈菊花状,尺寸为 8~50 μm ,平均尺寸约为 24 μm ,在晶界处有析出相存在,晶内有明显的球状析出相,平均尺寸约为 2 μm ,在尺寸较大的晶粒内部存在裂纹缺陷。已有研究表明^[21],第二相(晶界和晶内晶粒相)为 Mg_9Nd 和 $\text{Mg}_{12}(\text{Nd},\text{Zn})$ 。蠕变后 ZM6 合金的 α -Mg 晶粒尺寸为 38~118 μm ,平均尺寸为 75 μm 。在靠近晶界处分布有条状的第二相,晶内有明显的团簇状第二相以及细小的第二相,在晶粒内部存在裂纹缺陷。有学者研究表明^[22],第二相(晶界和晶内晶粒相)为 Mg_9Nd 和 $\text{Mg}_{12}(\text{Nd},\text{Zn})$ 。通过对比分析蠕变前后 ZM6 合金的组织变化可以发现,ZM6 合金蠕变后晶粒尺寸变大,第二相晶粒长大。

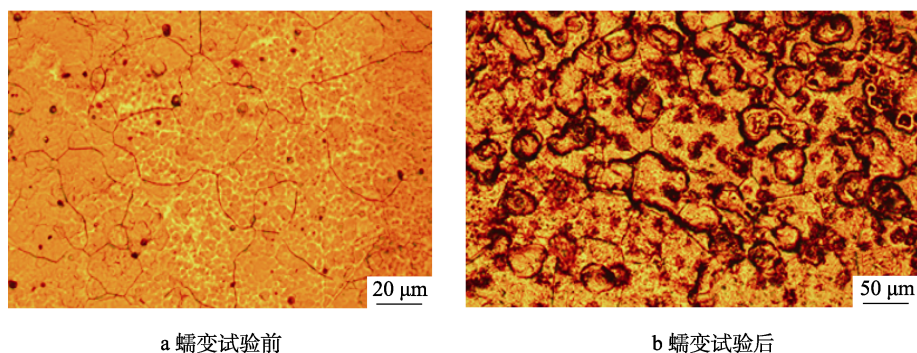


图 1 ZM6 合金微观组织金相照片

Fig.1 Microstructure metallography of ZM6 alloy: a) before creep test; b) after creep test

通过上述分析可知, ZM6 合金的蠕变机理为, 在温度和应力的共同作用下, 加速原子扩散和晶界的迁移, 晶界处和晶内第二相长大, 导致晶粒粗化。晶界处第二相粒子应力集中和晶内强度较低的第二相均易导致蠕变空洞形核, 并合并长大为微裂纹。同时, 晶粒粗化后, 材料晶界数量减少, 晶界对位错阻碍作用减弱, 位错滑移更容易发生, 更有利于孔洞生长和蠕变变形的增大, 从而加速材料的失效和断裂, 缩短材料的使用寿命。

1.2 蠕变本构模型

ZM6 合金的蠕变主要受位错滑移速率的影响, 根据 Sandström^[23]的位错密度随蠕变应变的演化方程, 当材料处于稳态蠕变阶段时, 材料内部位错密度大体上保持不变, 稳态蠕变速率的可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{ss} = 2\tau_L M \frac{\sigma^3}{(\alpha m G b)^3} / \left(\frac{m}{b c_L} - \omega \frac{\sigma}{\alpha m G b} \right) \\ \omega = \frac{m}{b} d_{int} \left(2 - \frac{1}{n_{slip}} \right) \\ c_L = \frac{m^2 \alpha G}{\omega (R_m - \sigma_y)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{ss}$ 为稳态蠕变速率; σ 为应力强度; ω 为动态回复常数; c_L 为一常数; M 为位错迁移率; ρ 为位错密度; τ_L 为位错线张力; α 为一常数; m 为 Taylor 因子; b 为柏格斯矢量的大小; n_{slip} 为材料滑移系数; d_{int} 为位错相互作用距离; G 为材料剪切模量; R_m 为材料的抗拉强度; σ_y 为屈服强度。

ZM6 合金蠕变过程中的位错迁移由位错滑移引起, 其迁移率可表示为:

$$M_g = \frac{\alpha m G D_{s0} b}{k_B T (\sigma - \sigma_y)} e^{\frac{\sigma b^3}{k_B T}} e^{\frac{Q}{R_G T}} \quad (2)$$

式中: M_g 为位错滑移迁移率; D_{s0} 为自扩散的指前系数; k_B 为 Boltzmann 常数; R_G 为气体常数; $Q(T)$ 为材料活化能; T 为温度。

将位错滑移迁移率式 (2) 代入式 (1), 得到最终的稳态蠕变速率关系式, 即:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = \frac{6 D_{s0} G b^2 \sigma^3}{5 k_B T d_{int} (R_m - \sigma_y - \sigma)} e^{\frac{\sigma b^3}{k_B T}} e^{\frac{Q(T)}{R_G T}} \quad (3)$$

为了保证在较宽应力和温度范围内式 (3) 能够准确描述蠕变速率的应力和温度相关性, 参考 Dyson 等^[24]的方法, 将该稳态蠕变速率公式改写为应力的双曲正弦函数。具体来说, 保留式 (3) 中与应力无关项的形式, 将与应力相关项则表示为关于应力的双曲正弦函数, 得到双曲正弦函数形式的稳态蠕变速率关系式, 即:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = \frac{A}{T} e^{\frac{Q(T)}{RT}} \sinh(B\sigma) \quad (4)$$

式中: A 和 B 为材料常数。

通过对 ZM6 合金蠕变变形过程中的组织变化及损伤特征进行分析, 可以确定, 其在蠕变过程中的主要蠕变损伤类型为晶粒粗化, 即第二相晶粒随蠕变变形的发生而长大。Arai^[25]根据 Gibbs-Duhem 关系得到了蠕变变形下晶粒粗化速率的关系式, Ashby 等^[26]将该粗化速率公式简化为:

$$r^3 = r_0^3 + Kt \quad (5)$$

式中: r 为任一时刻晶粒半径; r_0 为初始时刻晶粒半径; K 为表征晶粒粗化速率的常数。为了量化晶粒粗化对蠕变速率的影响, 定义如下的无量纲蠕变损伤因子 D , 描述晶粒粗化程度:

$$D = \frac{r^3}{r_0^3} - 1 \quad (6)$$

则蠕变损伤速率 $\dot{D}$ 可表示为:

$$\dot{D} = \frac{K}{r_0^3} = K' \quad (7)$$

因此, 根据蠕变损伤力学的方法, 将无量纲损伤因子 D 引入式 (4), 可得到 ZM6 合金的蠕变本构模型, 即:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{T} e^{\frac{Q(T)}{RT}} \sinh \left[\frac{B\sigma(1-K't)}{C} \right] \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 为材料常数。

2 模型参数确定与寿命预测

2.1 蠕变试验

试验采用 GB/T 2039—2012《金属材料单轴拉伸蠕变试验方法》规定的圆形截面棒状试样。采用 ECM-50 型金属高温拉伸蠕变及持久试验机, 最大试验力为 50 kN, 试验力控制精度 $\leq \pm 0.5\%$, 稳定阶段温度波动 $< \pm 1^\circ\text{C}$, 变形测量分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 。对于 ZM6 合金, 采用正交试验法, 在恒定应力 40 MPa 条件下, 进行 50、70、80、100 $^\circ\text{C}$ 的蠕变测试; 在恒定温度 80 $^\circ\text{C}$ 下, 进行 20、30、40、50 MPa 的蠕变测试; 在 50 $^\circ\text{C}$ /20 MPa 和室温/40 MPa 条件下, 进行 2 组蠕变测试。蠕变测试过程中, 先以 $0.67^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率将试样升温至规定温度, 保温 2 h, 随后 2 min 内加载至规定载荷, 开始记录试验时间和蠕变数据。试验时间为 500 h 以上, 以确保获得其稳定蠕变速率。

2.2 材料参数的确定

ZM6 合金蠕变试验结果如图 2 所示。ZM6 合金主要处于减速蠕变和稳态蠕变 2 个蠕变阶段, ZM6 合金在 50 $^\circ\text{C}$ /20 MPa 条件下的稳态蠕变速率为 $6.09 \times 10^{-10} \text{ h}^{-1}$, 50 $^\circ\text{C}$ /40 MPa 条件下的稳态蠕变速率为

$6.47 \times 10^{-9} \text{ h}^{-1}$, $80^\circ\text{C}/40 \text{ MPa}$ 条件下的稳态蠕变速率为 $3.19 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$, $80^\circ\text{C}/30 \text{ MPa}$ 条件下的稳态蠕变速率为 $1.12 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ 。根据 ZM6 合金蠕变曲线, 在相同应力水平条件下, 蠕变变形量随温度升高有一个先升高、后降低的趋势, 该现象与其他大部分金属材料的蠕变行为不同。相同温度条件下, 蠕变变形量随应力水平增大而升高。

根据试验数据, 40 MPa 应力条件下, 温度为 50°C 、 80°C 、 100°C 时, 稳态蠕变速率分别为 5.3×10^{-9} 、 2.1×10^{-8} 、 $9.3 \times 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ 。将以上数据和表 1 中材料参数代入式 (3), 得到 50°C 、 80°C 、 100°C 条件下的激活能 $Q(T)$ 分别为 2.477×10^4 、 2.267×10^4 、 $2.629 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 。

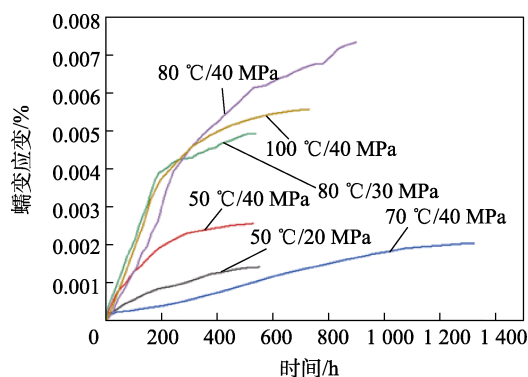


图 2 ZM6 合金蠕变曲线
Fig.2 Creep curve of ZM6 alloy

表 1 ZM6 合金材料参数
Tab.1 Material parameters of ZM6 alloy

参数	D_{S0}	b	k_B	d_{int}	R_G
值	1×10^4	3.21×10^{-10}	1.38×10^{-23}	7.76×10^{-9}	8.314

根据试验数据进行参数拟合, 确定本构模型式 (8) 中的参数, ZM6 合金的材料参数见表 2。

表 2 ZM6 合金蠕变本构模型参数
Tab.2 Parameters of creep constitutive model of ZM6 alloy

参数	值
A	0.043 85
B	0.109
C	$2 \times 10^{-4} - \frac{\sigma}{0.015 9} - \frac{\sigma}{0.406} \left(\frac{T-345}{345} \right)^2$
$Q(T)$	$2.477 \times 10^4 (50^\circ\text{C})$ 、 $2.267 \times 10^4 (80^\circ\text{C})$ 、 $2.629 \times 10^4 (100^\circ\text{C})$
K'	$0.101 - \frac{\sigma}{0.009 4} - \frac{\sigma}{3.23} \left(\frac{T-351}{351} \right)^2$

2.3 寿命预测

为验证 ZM6 合金蠕变本构模型对蠕变变形预测的准确性, 将上述参数代入式 (15), 将本构模型预测结果与试验结果进行对比, 50°C 、 80°C 、 100°C 不同应力水平下的蠕变应变曲线和拟合曲线如图 3~5 所示。 $50^\circ\text{C}/20 \text{ MPa}$ 载荷条件下, 误差小于 15%, $80^\circ\text{C}/30 \text{ MPa}$

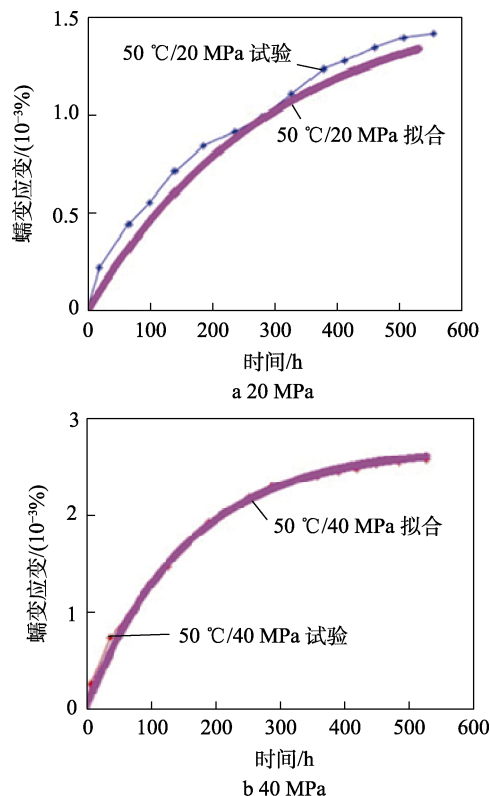


图 3 50°C 条件下各应力水平下蠕变应变与试验对比
Fig.3 Comparison of creep strain and test under different stress levels at 50°C

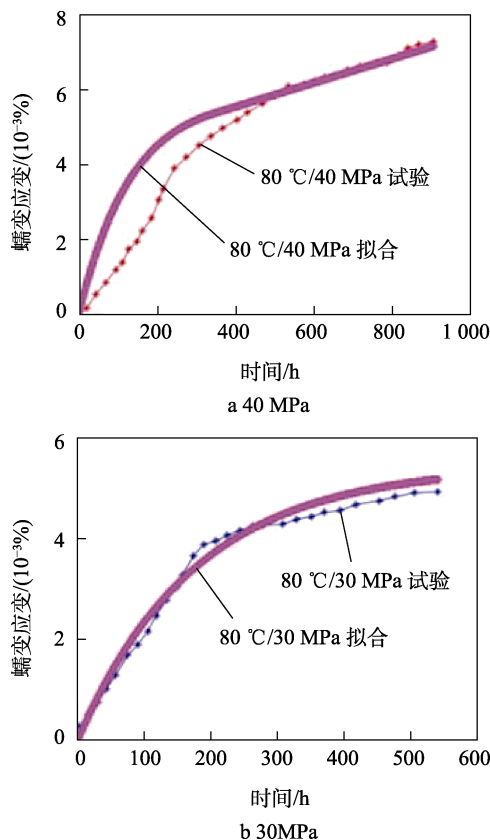


图 4 80°C 条件下各应力水平下蠕变应变与试验对比
Fig.4 Comparison of creep strain and test under different stress levels at 80°C

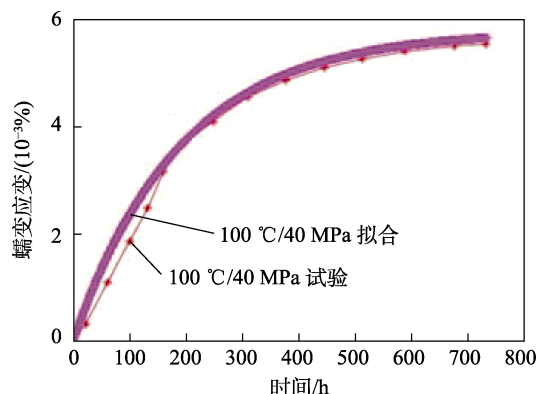


图 5 100 °C 条件下 40 MPa 应力水平下蠕变应变与试验对比

Fig.5 Comparison of creep strain and test under different stress levels at 100 °C

载荷条件下,对减速蠕变阶段的预测结果误差较大,对稳态蠕变阶段的预测结果误差小于 5%,其他载荷条件下模型预测结果与试验结果误差都小于 5%。可以看出,预测结果与试验结果吻合较好,该本构模型能够合理地描述不同温度和应力水平下 ZM6 合金的蠕变行为。

在 50 °C/40 MPa 条件下,将蠕变应变达到 0.003 作为退化失效阈值,对 ZM6 合金的寿命进行预测。由图 6 可知,ZM6 合金蠕变可分为减速蠕变和稳态蠕变 2 个阶段,稳态蠕变速率为 $6.47 \times 10^{-9} \text{ h}^{-1}$,得到服役寿命为 7.124 6 a。

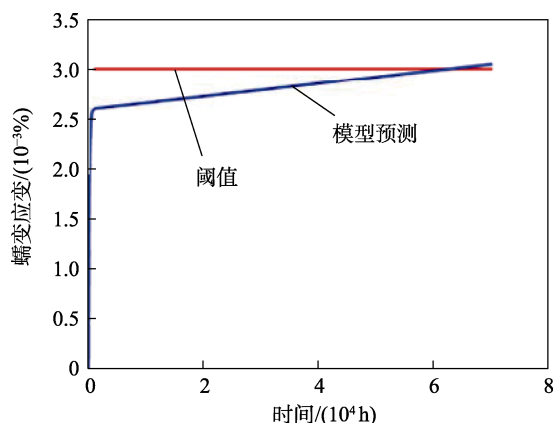


图 6 ZM6 合金蠕变寿命预测

Fig.6 Creep life prediction of ZM6 alloy

3 结论

本文开展了 ZM6 合金不同温度和应力水平下的蠕变试验,对 ZM6 合金蠕变试样蠕变前后的金相进行分析,将稳态蠕变速率方程引入蠕变损伤模型,建立了改进的蠕变损伤模型。根据试验结果对建立的模型进行了验证,得出如下结论。

1) 对蠕变损伤模型进行改进,将稳态蠕变速率

方程引入蠕变损伤模型,改进后模型的部分模型参数可由材料参数直接确定,其余模型参数可反映蠕变速率与温度和应力之间的关系,相较于原蠕变损伤模型减少了过多的拟合参数。

2) ZM6 合金在相同应力水平,50~100 °C 温度条件下,其蠕变行为和温度的相关性与其他常见金属材料不同,蠕变变形量随温度升高先升高、后降低。在相同温度,20~50 MPa 应力水平条件下,其蠕变行为和应力的相关性与其他常见金属材料相同,蠕变变形量随应力水平增大而升高。

3) 金相分析表明,ZM6 合金的蠕变损伤机理为晶粒粗化。据此建立了可表示晶粒粗化对蠕变速率影响的无量纲损伤因子,并将其引入蠕变损伤模型。该本构模型预测的 ZM6 合金蠕变变形与试验结果吻合较好,验证了模型的准确性,该模型可作为后续高精密复杂结构件蠕变性能仿真及寿命预测研究的基础。

参考文献:

- [1] 周堃, 罗天元, 张伦武. 弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6-11.
ZHOU K, LUO T Y, ZHANG L W. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(2): 6-11.
- [2] 吕瑛, 王爱清, 闫凯, 等. 微波功率放大组件加速贮存数据处理及寿命评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 108-117.
LYU Y, WANG A Q, YAN K, et al. Accelerated Storage Data Processing and Life Assessment of Microwave Power Amplification Modules[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 108-117.
- [3] 陆俭国, 骆燕燕, 李文华, 等. 航天继电器贮存寿命试验及失效分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 54-59.
LU J G, LUO Y Y, LI W H, et al. Storage Life Test and Failure Analysis of Aerospace Relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 54-59.
- [4] 谭源源. 装备贮存寿命整机加速试验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
TAN Y Y. Research on Accelerated Test Technology of Equipment Storage Life[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [5] 陈凯诺, 张福光, 杜光传, 等. 战术导弹贮存延寿工程实践关键问题研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 136-139.
CHEN K N, ZHANG F G, DU G C, et al. Study on Key Problems of Tactical Missile Storage Life Extension Engineering Practice[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 136-139.
- [6] 焦纲领, 朱曦全, 陈津虎. 海军战术导弹贮存试验方法与寿命评估研究[J]. 强度与环境, 2020, 47(5): 42-47.
JIAO G L, ZHU X Q, CHEN J H. Research on Storage Test Method and Life Evaluation of Naval Tactical Mis-

- sil[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(5): 42-47.
- [7] 王浩伟, 滕克难, 吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1004-1016.
WANG H W, TENG K N, LÜ W M. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [8] 仲莹莹, 张新明, 邓运来, 等. ZM6 合金室温蠕变机理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(4): 378-381.
ZHONG Y Y, ZHANG X M, DENG Y L, et al. Creep Mechanism of Mg-Nd-Zn-Zr(ZM6) Alloy at Ambient Temperature[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(4): 378-381.
- [9] 李壮. 2219T87 铝合金及其焊接材料常温蠕变行为[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
LI Z. Creep Behavior of 2219T87 Aluminum Alloy and Its Welding Materials at Room Temperature[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [10] 魏晓伟, 沈保罗, 易勇. 铸态 ZA27 合金的压蠕变行为[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1171-1174.
WEI X W, SHEN B L, YI Y. Compressive Creep Behavior of As-Cast ZA27 Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1171-1174.
- [11] 刘云旭, 朱启惠, 李兴仁. 40CrNiMoA 钢的常温蠕变规律及其影响因素[J]. 兵器材料科学与工程, 1990, 13(3): 1-6.
LIU Y X, ZHU Q H, LI X R. Creep Law of 40CrNiMoA Steel at Room Temperature and Its Influencing Factors[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1990, 13(3): 1-6.
- [12] 吾尔坎·黑那牙提. 长输天然气管道离心式压缩机转子常温蠕变特性及影响[J]. 化学工程与装备, 2020(6): 157-158.
Urkan H. Creep Characteristics and Influence of Centrifugal Compressor Rotor in Long-Distance Natural Gas Pipeline at Room Temperature[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(6): 157-158.
- [13] 杨柳. 钢丝绳常温蠕变性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
YANG L. Study on Creep Performance of Steel Wire Rope at Room Temperature[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [14] 王卫永, 闫守海, 张琳博, 等. Q345 钢高温蠕变试验及考虑蠕变后钢柱抗火性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 47-54.
WANG W Y, YAN S H, ZHANG L B, et al. Creep Test on Q345 Steel at Elevated Temperature and Fire Resistance of Steel Columns Considering Creep[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(11): 47-54.
- [15] 陈晓亚, 李全安, 陈雷雷, 等. Mg-5Gd-3Y-0.5Zr 铸造镁合金的高温蠕变行为[J]. 铸造, 2015, 64(8): 776-779.
CHEN X Y, LI Q A, CHEN L L, et al. High Temperature Creep Behavior of Mg-5Gd-3Y-0.5Zr Cast Magnesium Alloy[J]. Foundry, 2015, 64(8): 776-779.
- [16] 凌小君, 郑小梅, 夏日, 等. 高温合金 FGH4095 温度和时间依赖的单向加载蠕变本构关系[J]. 力学季刊, 2024, 45(4): 961-969.
LING X J, ZHENG X M, XIA R, et al. Temperature and Time Dependent Creep Constitutive Relationship of Superalloy FGH4095 under Unidirectional Loading[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2024, 45(4): 961-969.
- [17] 徐显强, 董显娟, 徐勇, 等. 7050 铝合金蠕变本构模型及其泛化能力研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(7): 96-103.
XU X Q, DONG X J, XU Y, et al. Creep Constitutive Model and Generalization Ability of 7050 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(7): 96-103.
- [18] LIANG Y, LUO Y F, SUZUKI K, et al. Initial Damage Mechanism of Nickel-Based Alloy 625 under Creep Loadings at Elevated Temperatures[J]. The Proceedings of Conference of Tohoku Branch, 2019, 54: 133.
- [19] 张诗昌, 宗钦, 胡衍生, 等. 高温低应力下 AZ31 镁合金的蠕变性能及蠕变机理[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 291-295.
ZHANG S C, ZONG Q, HU Y S, et al. Creep Property and Mechanism of AZ31 Magnesium Alloy under High Temperature and Low Stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 291-295.
- [20] 李超, 万敏, 黄霖. 7B04 铝合金蠕变过程中析出相的影响因素[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 13-17.
LI C, WAN M, HUANG L. Effect on Precipitation Phases of 7B04 Aluminum Alloy during Creep Process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(2): 13-17.
- [21] 李誉之. Co-Al-W 新型钴基高温合金高温性能及蠕变机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
LI Y Z. Study on High Temperature Properties and Creep Mechanism of New Co-Al-W Superalloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [22] 赵志远, 陈深传, 乔冬福. Mg-Nd-Zr 系 ZM6 合金热强性能的改进[J]. 航空材料, 1983, 11(1): 12-15.
ZHAO Z Y, CHEN S C, QIAO D F. Improvement of Thermal Strength of Mg-Nd-Zr ZM6 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 1983, 11(1): 12-15.
- [23] SANDSTRÖM R. Primary Creep at Low Stresses in Copper[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 873: 144950.
- [24] DYSON B. Use of CDM in Materials Modeling and Component Creep Life Prediction[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2000, 122(3): 281-296.
- [25] ARAI H. Role of Induced Stress in Ostwald Ripening in Solid Matrices[J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1986, 27(3): 151-159.
- [26] ASHBY M F, DYSON B F. Advances in Fracture Research[M]. Oxford: Pergamon Press, 1984: 3-30.