

硬铝合金 2A12 的蠕变损伤行为及分析

王想生¹, 赵彬¹, 冯震宙²

(1. 西北工业大学 工程力学系, 西安 710129; 2. 中国一航第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 在 210 °C、不同载荷下对硬铝合金 2A12 板状试样进行了单轴拉伸蠕变实验, 得到了硬铝的蠕变损伤参数以及断裂时的部位和损伤度。在此基础上建立了硬铝合金 2A12 板蠕变试样的有限元模型, 基于简化的 $K-R$ 损伤模型, 分析了在 210 °C、恒载荷条件下的试样应变、损伤等随时间的变化规律以及试样蠕变损伤与位置的关系。结果表明, 数值模拟与试验结果基本一致, 试样中心蠕变曲线都具有稳态阶段和损伤扩展阶段, 与单轴试验的应变曲线十分相似。整个试样在离中心大约 9~10mm 处损伤比较严重, 呈现明显局部化特征。

关键词: 硬铝合金 2A12 蠕变损伤; 数值模拟

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)05-0103-04

航空、航天、核电、化工工业过程经常存在高温环境下服役的金属承载构件。这些构件必须考虑蠕变的影响。Kachanov 和 Rabotnov 在研究构件持久寿命预测时, 提出了连续度与损伤度的概念^[1~4], 发展了用连续损伤力学分析构件的新理论。法国的 Lemaitre^[5]用连续介质力学与热力学的观点研究了损伤对金属材料的弹塑性的影响; 随后, 英国的 Leckie^[6]和 Hayhurst^[7~11]研究了损伤和蠕变的耦合作用。鉴于应力状态对金属材料的蠕变和剩余寿命有着重要的影响, Hayhurst^[7~11]研究了构件在多轴应力下的蠕变与损伤。

针对金属的蠕变损伤问题, 本文以工程中常用的硬铝合金 2A12 为例, 采用试验与有限元模拟相结合的方法研究了其蠕变损伤行为, 损伤模型采用简化的 $K-R$ 模型, 损伤通过 ABAQUS 软件自带用户子程序 CREEP 引入^[12], 通过计算得到的位移时间关系曲线与试验结果非常接近, 证实了该模型可用于计算合金的蠕变损伤参数。

1 拉伸蠕变试验

1.1 装置与试样

拉伸蠕变试验装置为 CSS2905 高温蠕变持久试

验机, 拉伸蠕变试验的具体操作和试验方法见 [13]。本试验采取恒温 (210 °C) 下不同载荷的方式进行, 试验材料为硬铝合金 2A12 其成分如表 1^[14]所示, 试样为标准板状试样, 其形状与尺寸如图 1 所示。

表 1 硬铝合金 2A12 的化学组成 /w %

Table 1 Chemical constitution of duralumin alloy 2A12 /w %

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Ti
3.8~4.9	1.2~1.8	0.5	0.5	0.3~0.9	0.1	0.3	0.15

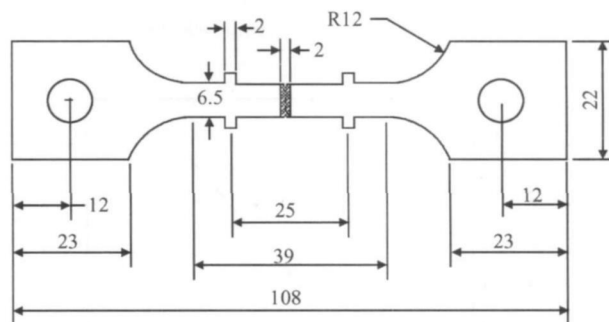


图 1 单轴拉伸蠕变实验的试样

Fig 1 The specimen of uniaxial tension creep test

1.2 试验处理方法

典型单轴拉伸蠕变曲线分为三个阶段, 初始阶段由于突然加载导致蠕变变形也突增, 然后蠕变率逐渐减小; 第二阶段蠕变率基本保持不变; 在第三阶段由于试件产生损伤导致蠕变率急剧增加, 如图 2 所示。为了得到精度高的蠕变损伤常数, 本文采用对蠕变-时间曲线进行求导来得到第二阶段最小蠕

收稿日期: 2007-08-29; 修订日期: 2008-03-09

作者简介: 王想生 (1984), 男, 硕士研究生, (E-mail) wxsd@yahoo.com.cn

变率(稳态蠕变率),得到的蠕变率-时间曲线如图 3 所示。处理试验数据得到最小蠕变率-载荷曲线(图 4 所示)和持久强度曲线(图 5 所示),通过最小蠕变率-载荷曲线确定蠕变常数 B 和 n ,通过持久强度曲线确定损伤常数 D 和 λ 。

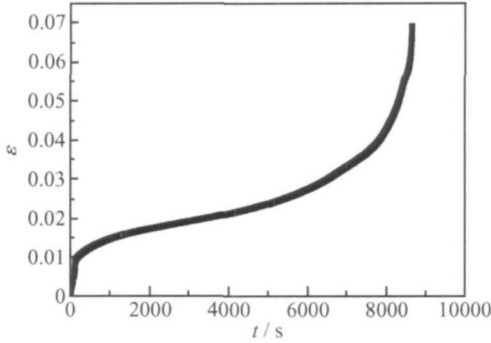


图 2 典型单轴拉伸蠕变曲线

Fig. 2 The typical curves for uniaxial tension creep test

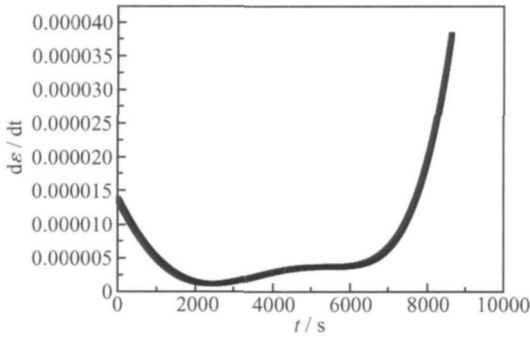


图 3 蠕变率-时间曲线

Fig. 3 The curves for creep ratio-time

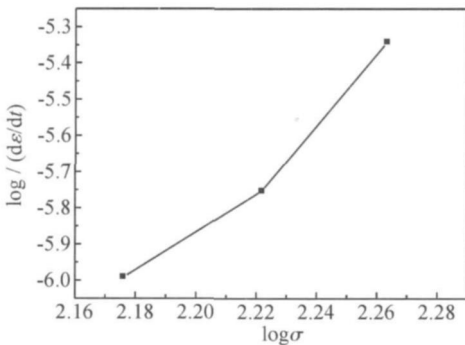


图 4 最小蠕变率-载荷曲线

Fig. 4 The curves for minimal creep rate-load

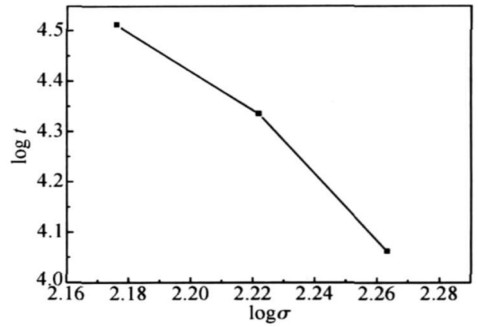


图 5 持久强度曲线

Fig 5 The curves for creep rupture strength

损伤。金属的蠕变一般发生在高温环境下持续加载,在这时,金属的粘塑性就产生延性变形,金属蠕变损伤主要是材料内部的晶格间位错的累积,进而在晶界和晶格间产生微裂纹、微孔洞^[15~17]。考虑蠕变与损伤的耦合,采用了修改后的 $K-R$ 模型^[2~3]:

$$\dot{\epsilon} = B \frac{(\sigma - \sigma_0)^n}{(1 - \lambda)^n} \quad (1)$$

$$= D \frac{[\sigma_1 + (1 - \lambda)\sigma]}{(1 - \lambda)} \quad (2)$$

式中 ϵ 表示等效蠕变, σ 表示等效应力, σ_1 表示最大主应力, λ 表示损伤变量,在 0 到 1 之间变化, $\lambda = 0$ 为无损伤, $\lambda = 1$ 为完全(理论)损伤。 D, B, n, λ , 分别为材料常数,由前面的单轴蠕变曲线与持久强度曲线确定。参数 λ 在 0 到 1 之间变化,它取决于材料蠕变损伤的应力敏感性,当 $\lambda = 0$ 时,损伤由等效应力控制; $\lambda = 1$ 时,损伤由最大主应力控制。本研究仅讨论 $\lambda = 0$ 的情况,这是一种较常见的简单情况^[13],为了简化计算假设 $\lambda = 0$ 。

2.2 有限元模型

在数值模拟中采用 ABAQUS 6.5.1 模拟了板蠕变试验过程,模拟试验与试验的条件一致。分析采用三维实体模型,共 1540 个节点,948 个单元,采用 C3D8R 单元,已知材料弹性模量 $E = 60000\text{MPa}$ 泊松比 $\nu = 0.3$ 。所用 210 硬铝的蠕变损伤参数由单轴蠕变试验获得,具体数值如下: $B = 1.625 \times 10^{-21}$, $n = 6.73$, $D = 4.26978 \times 10^{-16}$, $\lambda = 4.6986$

3 试验与有限元模拟结果分析

从上述实验与模拟的结果可以得到,实验与模型所得的蠕变曲线基本一致。图 6,图 7,图 8 分别表示 1800N, 2000N, 2200N 载荷下试验和数值模拟试样中心的蠕变对比曲线。图中 FEM 和 Experiment 分别表示模拟和试验的试样中心蠕变曲线,曲

2 数值模拟模型

2.1 蠕变损伤本构方程

蠕变损伤是蠕变变形过程中发生的材料不可逆

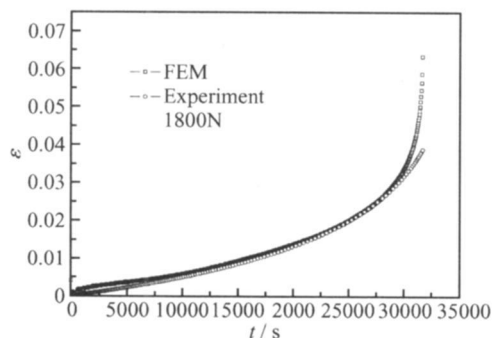


图 6 实验与模拟蠕变对比曲线 (1800N)
Fig. 6 The tensile creep ε as a function of time for FEM and Experiments (1800N)

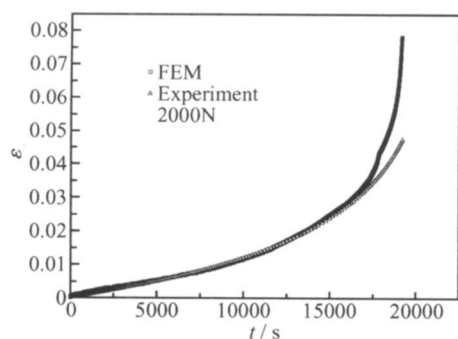


图 7 实验与模拟蠕变对比曲线 (2000N)
Fig. 7 The tensile creep ε as a function of time for FEM and Experiments (2000N)

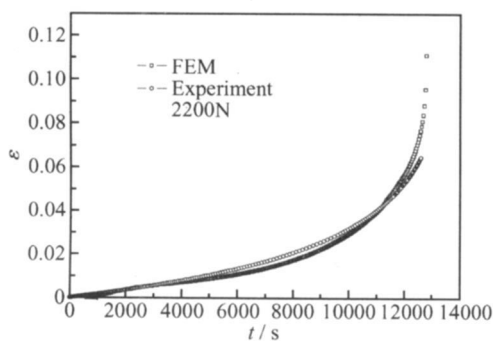


图 8 实验与模拟蠕变对比曲线 (2200N)
Fig. 8 The tensile creep ε as a function of time for FEM and Experiments (2200N)

线吻合的较好,也存在一定差异。由于实验初始阶段位移计调零存在人为误差以及开始时受力不稳定导致第一阶段曲线与模拟曲线不一致,在这里我们忽略第一阶段的蠕变;进入第二阶段以后,蠕变从零开始实验与模拟曲线吻合的较好。在接近破断时候,数值模拟曲线的破断很快,其对应蠕变率远大于实验曲线对应值,这是由于在对实验进行处理求蠕变损伤常数时,将断裂时的损伤值设为 1 而实际上

损伤为一个小于 1 的数,导致得到的材料参数偏大。试验试样断裂发生在距离中心 9~10mm 处(在标距范围内),并产生明显的缩颈现象,断裂试件如图 9 数值模拟时结果与实验结果基本一致,最大损伤发生在距离模型中心 9~10mm 处,如图 10,数值模拟时试件中心的损伤-时间曲线如图 11。

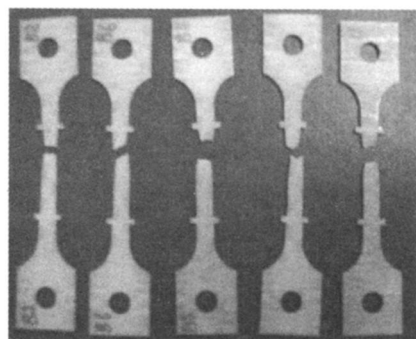


图 9 断裂试件照片
Fig. 9 The photo for failure specimen

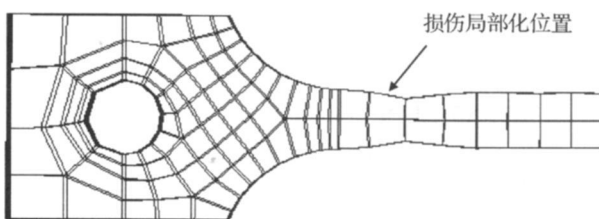


图 10 板损伤局部化
Fig. 10 Ban with obvious damage

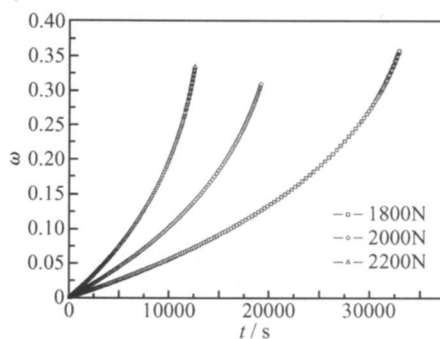


图 11 板中心损伤-时间曲线
Fig. 11 Typical tensile damage ω as a function of time

4 讨论

(1) 在不考虑损伤时,可以通过板在不同载荷下的稳态蠕变率来求得蠕变参数 B, n ;考虑损伤时,可以通过板在不同载荷下的破坏时间来确定损伤参数 D , ($=$)。

(2) 在有限元分析时, 板的损伤出现局部化(这是与实验一致的), 并且随着时间的增加, 局部损伤可能达到 1, 本文没有做进一步的有限元分析。

(3) 本工作主要研究是 $\sigma = 0$ 即损伤主要由等效应力控制, 在其它情况下的蠕变损伤分析也很重要, 这需要进一步的研究。

5 结论

(1) 平板蠕变试验与数值模拟结果具有一致性, 所获得的试样中心蠕变曲线有明显的减速、恒速和加速的三个阶段。

(2) 试样损伤的局部化特征很明显, 试样的失效首先发生在试样两端距中心约 9~10mm 处。

(3) 根据试验数据和有限元数值模拟结果, 验证了基于 $K-R$ 损伤理论所建立的有限元模型的合理性。

参考文献:

- [1] KACHANOV L M. On Creep Rupture Time [M]. Izv Acad Nauk SSSR, Otd Tech Nauk, 1958
- [2] KACHANOV L M. Introduction to Continuum Damage Mechanics [M]. Martinus Nijhoff Publishers Dordrecht The Netherlands, 1986
- [3] KACHANOV L M. The Theory of Creep [M]. British Library Boston Sp W etmerley, 1960
- [4] RABOTINOV Y N. Creep Problems in Structural Members [M]. North-Holland Amsterdam, 1969.
- [5] LEMAITRE J A. Course on Damage Mechanics [M]. Berlin Springer-Verlag, 1992
- [6] LECKIE F A, HAYHURST D R. Constitutive equations for creep rupture [J]. Acta Metall, 1977; 25: 1059-1070
- [7] HAYHURST D R. Creep rupture under multi-axial states of stress [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1972; 20: 381-390
- [8] KOWALEWSKI Z L, HAYHURST D R, DYSON B F. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminum alloy [J]. Journal of Strain Analysis, 1994; 29: 309-316
- [9] HAYHURST D R, DIMMER P R, MORRISON C J. Development of continuum damage in the creep rupture of notched bars [A]. Phil Trans R Soc [C]. London, 1984; A311: 103-129
- [10] KOWALEWSKI Z L, HAYHURST D R, DYSON B F. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminum alloy [J]. Journal of Strain Analysis, 1994; 29: 309-316
- [11] DUNNE F P E, OTHMAN A M, HALL F R, et al. Representation of uniaxial creep curves using continuum damage mechanics [J]. Int J Mech Sci, 1990; 32: 945-957
- [12] YUE Z F, LU Z Z, WANG X M. A Numerical Study of Damage Development and Creep Life in Circular Notched Specimens During Creep [J]. Mater High Temp, 2002; 19: 147-152
- [13] 金属力学及工艺性能试验方法标准 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [14] 武恭, 姚良均, 李震夏, 等. 铝与铝合金材料手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1994
- [15] 李兆霞. 损伤力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [16] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
- [17] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997

Behaviour and Analysis of Creep Damage of Duralum in Alloy 2A12

WANG Xiang-sheng ZHAO Bin, FENG Zhen-zhou

(1. Department of Engineering Mechanics, Northwestem Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Avic I the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract The creep-damage parameters, localization of damage and the damage degree were obtained through the uniaxial tension creep test with duralum in alloy 2A12 in the condition of constant temperature (210 °C) and different loads. The finite element model was established on a plate creep specimen. The variation of creep strain with time and the evolution of creep damage at 210 °C under constant load were analyzed using FEM incorporated with modified $K-R$ creep damage constitutive equations. The result of numerical simulation was accord with conventional creep tests. The result also showed that the creep damage at the central part was high and localization of damage was obvious.

Key words duralum in alloy 2A12; creep damage; numerical simulation