

文章编号:1000-582X(2005)03-0047-03

镁合金循环蠕变的损伤本构关系*

曾祥国¹,李渊¹,范镜泓^{1,2}

(1.重庆大学资源及环境科学学院工程力学系,重庆 400030;2.美国ALFRED大学机械系,Alfred,NY,14802-1205)

摘要:利用MTS809高级材料试验机对镁合金AM50进行了系列蠕变试验,基于微结构和缺陷的分析提出各向同性标量损伤变量,在能量释放率概念的基础上导出损伤变量的演化方程。针对镁合金的循环蠕变强化和回复软化的特点建立内应力演化方程,在不可逆热力学和内应力理论上发展了考虑损伤的循环蠕变本构关系。理论分析与试验结果吻合较好,表明所建立的计及损伤的循环蠕变本构模型能够描述镁合金的循环蠕变现象。

关键词:镁合金;损伤;循环蠕变;本构模型

中图分类号: O344.6;O346.5

文献标识码: A

随着全球范围内的能源紧缺以及各国政府对环境保护的日益重视,镁合金作为“21世纪最具发展潜力和前途的绿色工程材料^[1-3]”,以其显著的减重节能效果、优良的吸振降噪能力、良好的生产工艺性能在汽车工业中呈现出鲜明的优势。但是,由于镁合金的蠕变抗力较差,限制了其在汽车发动机和传动系统等方面的应用。因此提高其蠕变性能就成为目前亟待解决的关键问题。这一问题的解决必然涉及到镁合金构件的蠕变分析和损伤计算。而分析计算的结果很大程度上取决于所应用的力学模型,因此建立能够准确描述镁合金循环蠕变变形行为的模型就变得至关重要。

1 试样

材料选用AM50,试样几何尺寸如图1所示。

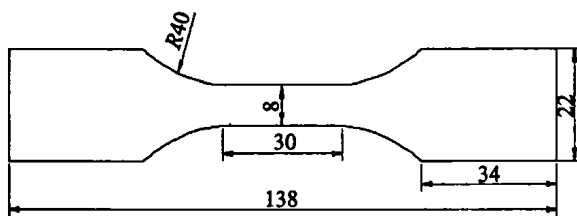


图1 试样(单位:mm)

2 损伤演化方程

镁合金AM50的原始组织主要为 α -Mg基体和

沿晶界析出的大量板条状 β 相($Mg_{17}Al_{12}$)以及在压铸过程中形成的大量缩孔,如图2所示。

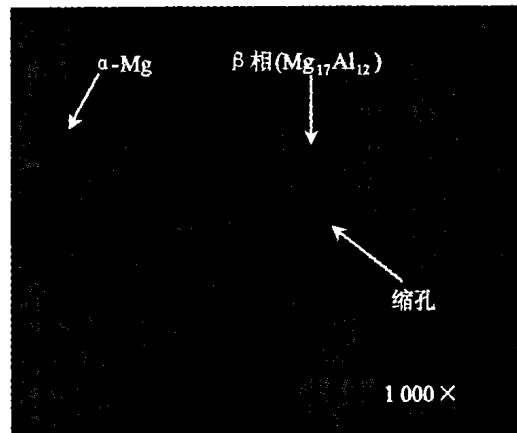


图2 镁合金AM50的显微组织形貌

在应变控制加载的低周疲劳试验(应变幅 $\epsilon_a = 0.5\%$,应变比为 $R = 0.1$)中,对试件断口取样并利用扫描电镜(SEM)进行金相观察,组织特征如图3所示。发现裂纹沿基体中的显微疏松(即微孔洞的聚集处)择优扩展。同时清楚地观察到断口内部缩孔的形貌,如图4所示。

由此可见,压铸镁合金内部存在大量缩孔、微裂纹等缺陷,在蠕变变形过程中,微孔洞不断聚集、形核长大,微裂纹萌生汇合并扩展,宏观上就表现为性能的劣化,如强度、屈服极限下降、蠕变抗力减小和寿命缩短

* 收稿日期:2004-04-30

基金项目:重庆市科技计划资助项目(7774)

作者简介:曾祥国(1960-),男,重庆人,重庆大学副教授,博士,主要从事材料的本构关系、多尺度模型方法、塑性理论、损伤和疲劳等方面的研究。

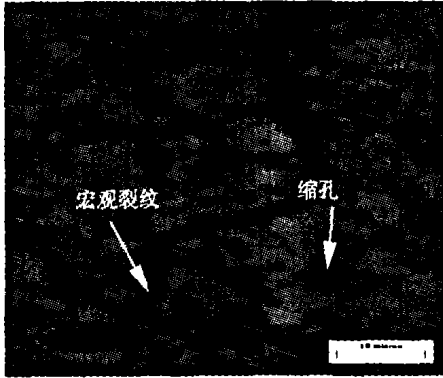
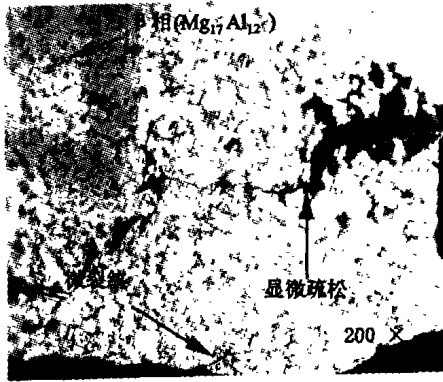


图3 微裂纹的萌生与扩展

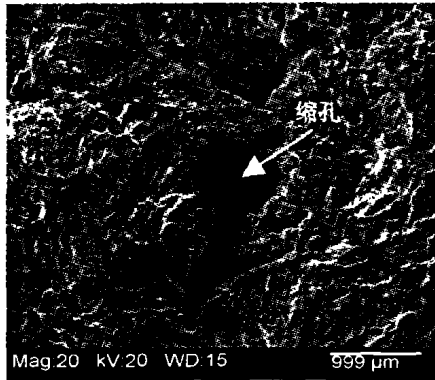


图4 缩孔的形貌

等现象。笔者认为镁合金 AM50 在整个蠕变变形过程中均匀劣化,考虑引入宏观各向同性标量损伤变量 D 作为热力学系统的内变量,描述微孔洞、微裂纹的状态。

从应变能的角度考虑,损伤是不可逆的耗散过程,因此循环蠕变变形过程中的损伤演化必然伴随着应变能的耗散。也就是说,能量的耗散反映了蠕变过程中损伤的演化。

在本文的循环蠕变分析中,材料承受应力水平较低,弹塑性变形较小,由此引起的损伤可忽略不计。再加上循环次数较少(一般只有 6 到 8 个循环),忽略循环载荷可能导致的疲劳损伤。因此只把损伤引入蠕变部分,仅考虑蠕变损伤引起的能量耗散,认为总的耗散能 Ω 近似等于蠕变耗散能 U_c ,即

$$\Omega \approx U_c \quad (1)$$

蠕变应变率为^[4]

$$\dot{\varepsilon}^c = A \left(\frac{\sigma - R}{1 - D} \right)^n \quad (2)$$

故有蠕变过程中的耗散能率

$$\dot{U}_c = \sigma \dot{\varepsilon}^c = A \left(\frac{\sigma - R}{1 - D} \right)^n \sigma \quad (3)$$

定义损伤驱动力 γ , 即与损伤变量 D 对偶的广义应力, 又称损伤应变能释放率^[4]

$$-\gamma = \frac{1}{n} \frac{\partial \dot{U}_c}{\partial D} \quad (4)$$

联立式(3)、(4)得

$$-\gamma = \frac{1}{n} \frac{\partial \dot{U}_c}{\partial D} = A \left(\frac{\sigma - R}{1 - D} \right)^n \frac{\sigma}{1 - D} \quad (5)$$

为了进一步得到损伤变量的演化方程,假设存在外凸的耗散势函数 ψ , 通过 Legendre 变换得到对偶的势函数 ψ^* , 根据正交法则可得到损伤演化的动力学方程^[5]

$$\dot{D} = \frac{\partial \psi^*}{\partial \gamma} \quad (6)$$

在本文的分析中,弹塑性损伤忽略不计,只考虑蠕变损伤,认为在各向同性的情况下,耗散势 ψ^* 仅依赖于 γ , 文献[6-7]给出了耗散势 ψ^* 为 γ 的幂函数的表达式,即

$$\psi^* = \frac{\lambda_0}{r_0 + 1} \left(\frac{-\gamma}{\lambda_0} \right)^{r_0 + 1} \quad (7)$$

式中 λ_0, r_0 为表征材料损伤演化特征的参数, r_0 在 0 到 1 之间变化。

代入式(6),得

$$\dot{D} = \left(\frac{-\gamma}{\lambda_0} \right)^{r_0} \quad (8)$$

将式(5)中 $-\gamma$ 的表达式代入,得到损伤演化方程

$$\dot{D} = \lambda_1 \left[\left(\frac{\sigma - R}{1 - D} \right)^n \frac{\sigma}{1 - D} \right]^{r_0} \quad (9)$$

其中 $\lambda_1 = \left(\frac{A}{\lambda_0} \right)^{r_0}$ 。

大多工程材料在高温时 r_0 趋近于 1, 故可将式(9)简化为

$$\dot{D} = \lambda_1 \left(\frac{\sigma - R}{1 - D} \right)^n \frac{\sigma}{1 - D} \quad (10)$$

即

$$\dot{D} = \lambda \left(\frac{\sigma}{1 - D} \right) \dot{\varepsilon}^c \quad (11)$$

其中 $\lambda_1 = \lambda A_0$ 。

3 蠕变本构方程

镁合金的循环蠕变过程包括加载(弹塑性加载)、恒载(蠕变)、完全卸载(弹性卸载)、回复系列过程,因此总应变可分为弹性、塑性和蠕变应变,即

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c \quad (12)$$

弹性应变部分,由 Hooke 定律给出;塑性部分用内

时塑性理论计算；基于连续介质损伤力学和内应力理论，设蠕变应变率为^[4]

$$\dot{\varepsilon}^c = A \left| \frac{\sigma - R}{1 - D} \right|^n \text{sign}(\sigma - R) \quad (14)$$

其中 R 是蠕变内应力, D 是损伤参数, A, n 是材料常数, sign 是符号函数。

一维情况下的演化准则可表示为^[4,8]

$$\dot{R} = B_1 (R_s - R)^p \dot{\varepsilon}^c \quad (15)$$

其中 R_s 是在应力 σ 作用时稳态蠕变过程中内应力 R 的最大值, 材料常数 B_1, p 是温度的函数。

完全卸载后, 由于内应力的作用, 蠕变应变会发生反转, 开始回复。回复内应力 R_u 从零开始增加, 材料软化。当增加到与蠕变过程中产生的可回复内应力相等时, 保持不变。此时, 残余内应力为 $R_0 - R_u$ 。回复过程的内应力的演化准则修正为^[4]

$$\dot{R}_u = B_2 (R_r - R_u)^k \quad (16)$$

其中 \dot{R}_u 是回复内应力的变化率, $R_r = R_0 - R_i$ 是可回复的饱和值, R_i 是蠕变过程中产生的不可回复的内应力, R_0 是卸载前所达到的内应力值。 B_2, k 是材料常数, 是温度的函数。

设经过松弛时间 Δt_d 后重新加载, 达到稳态过程时的内应力最大值 $R_i^{(i+1)}$ 为^[4]

$$R_i^{(i+1)} = R_i^{(i)} \left[1 + \beta \left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma} \right) \Delta t_d \right]^\alpha \quad (17)$$

式中 $R_i^{(i)}$ 是前次循环内应力的最大值, σ_n 是循环软化的门槛应力, α, β 是材料常数。如果 $\beta < 0$, 材料发生软化, 反之, $\beta > 0$ 时, 材料硬化。

4 试验与分析

4.1 材料参数确定

用曲线拟合的方法对 AM50 在 110 °C、90 MPa 时的应力 - 塑性应变曲线在 $z = 0$ 的领域内的系列实验点进行拟合^[9], 确定塑性应变计算时的待定参数见表 1。

表 1 AM50 的塑性材料参数

参数	C_1	C_2	C_3	α_1	α_2	α_3
参数值	1 892 180	192 036	8 169.59	26 930.1	29 511.6	340.593

对于蠕变材料常数, 采用试误法 (try and error method) 确定, 具体数值详见表 2。在程序调试过程中, 近似认为蠕变阶段内应力的饱和值 R_s 、可回复的内应力的饱和值 R_r 和循环软化时的门槛应力 σ_n 是外载的函数: $R_s = 0.8\sigma, \sigma_n = 0.3\sigma, R_r = 0.85\sigma$ 。

表 2 AM50 的蠕变材料参数

参数	A	n	B_1	p	B_2	k	α	β
参数值	8.50×10^{-12}	4.85	650.5	0.59	0.81	0.79	1.30	-0.05

4.2 对循环蠕变的描述(包括回复、蠕变加速)

利用所发展的本构模型和算法分析计算得到的蠕变曲线与实验结果相比, 吻合较好, 如图 5 所示。说明所建立的模型在一定程度上能够描述循环蠕变的塑性、蠕变加速、回复现象, 具有重要的理论参考价值。同时也注意到, 如果不计及损伤的影响, 数值计算与实验结果相比, 总应变明显偏小, 反映了损伤对循环蠕变变形的重要影响, 进一步证明了本文工作的可行性。

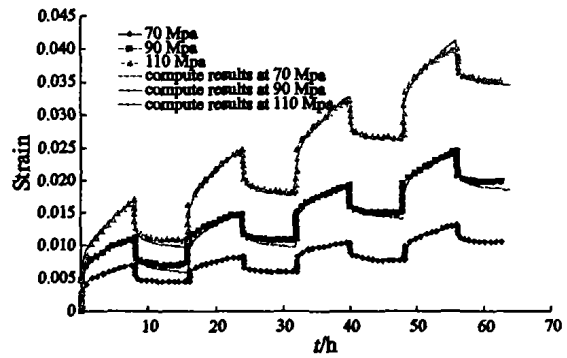


图 5 AM50 在 110 °C、70/90/110 MPa 的循环蠕变曲线

5 结语

基于微结构的观察分析引入宏观各向同性标量损伤变量, 建立镁合金循环蠕变的损伤本构模型, 对在 MTS 试验机上得到的镁合金 AM50 循环蠕变试验曲线进行模拟, 能够描述蠕变加速、回复现象, 为镁合金的应用提供了更详尽的理论依据, 用于工程结构分析和寿命预测具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] AGHION E, BRONFIN B, ELIEZER D. The Role of the Magnesium Industry in Protecting the Environment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 381 - 385.
- [2] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium Properties-applications-potential [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A302(1): 37 - 45.
- [3] 刘正, 王越. 镁基轻质材料的研究与应用 [J]. 材料研究学报, 2000, 14(5): 449 - 456.
- [4] GONG Z L, HSU T R. A Constitutive Model for Metals Subjected to Cyclic Creep [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1991, 113(4): 419 - 424.
- [5] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [6] LEMAITRE J. A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture [J]. J Eng Mater Tech, 1985, 107: 83 - 89.
- [7] 张行, 赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Modeling of Liquidus Temperature for Al – Si Cast Alloys with Adaptive Neuro-fuzzy Inference System

XIA Bo-cai^{1,2}, QIAN Han-cheng¹, AWAD SAMIR H¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Institute of Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: During the melting and processing practices, an accurate knowledge of liquidus temperature is necessary in the determination of process parameters relating to a given alloy. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) modeling method has been used to improve accuracy of prediction for liquidus temperature based on the compositions of Al – Si series cast alloys. The developed fuzzy inference system could extract Takagi-Sugeno type fuzzy rules from data directly, and has a feed-forward network structure with supervised learning capability. In order to adapt the parameters of the model, the proposed fuzzy inference system is trained over a wide range of compositions from the published data of industrial alloys. The result shows that, the developed ANFIS model can capture non-linear relationships between compositions and liquidus temperature, and then provides better prediction than the reported multiple statistic analysis. The developed model can be used to predict the liquidus temperature needed in computer modeling and thermodynamic calculation, which are needed in the aluminium alloys casting industry and research.

Key words: cast aluminium alloy; liquidus temperature; fuzzy inference system; prediction

(编辑 李胜春)

(上接第49页)

[8] MROZ Z, TRAMPCZYNSKI W A. On the Creep Hardening Rule for Metals with Memory of Maximal Prestress[J]. International Journal of Solids and Structures, 1984,20(5): 467 – 486.

[9] 范镜泓,彭向和,曾祥国. 两种内蕴时间本构方程的定量比较及其实验验证[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1985,8(6):35 – 41.

Cyclic Creep Constitutive Model of Magnesium Alloy at High Temperature

ZENG Xiang-guo¹, LI Yuan¹, FAN Jing-hong^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Engineering, Alfred University, N Y 14802 – 1205, U. S. A)

Abstract: With high strength-to-weight ratio and excellent technological properties, Magnesium Alloy plays a more and more important role in automotive industry. But the inferior high temperature creep resistance limited its application to power components such as engine and transmission cases. In order to investigate the cyclic creep behavior of Magnesium Alloy at high temperature, creep tests of plate specimens AM50 were conducted. Through the analysis about the micro-structure and defects of AM50, an isotropic and scalar damage parameter was introduced into an existing creep constitutive model. Furthermore, a Fortran code based on numerical algorithm was developed to simulate plasticity, cyclic creep, and recovery phenomenon observed. Comparisons between calculated results and experimental data show good agreement.

Key words: magnesium alloy; damage; cyclic creep; constitutive model

(编辑 张小强)