

# ZK60 合金单向拉伸过程中空洞行为的数值模拟

于彦东<sup>1</sup>, 冯娟<sup>1</sup>, 江鹏<sup>1</sup>, 王国军<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北轻合金责任有限公司, 黑龙江, 哈尔滨, 150086)

**摘要:**对 ZK60 合金超塑性单向拉伸过程中空洞生长进行了数值模拟和实验研究. 分析了 ZK60 合金单向拉伸过程中空洞生长机理, 并提出相应的模型. 运用三维刚粘塑性有限元程序, 模拟预报空洞半径和体积分数在单向拉伸过程中的变化规律. 通过图像分析软件对材料微观组织进行观察, 确定了实际空洞半径和体积分数. 对模拟结果和实验进行了对比分析, 得到模拟的空洞半径和体积分数与实验结果吻合良好, 模拟的空洞长大规律呈指数增长模型.

**关键词:** ZK60 合金; 空洞半径; 空洞体积分数; 数值模拟

**中图分类号:** TG376.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)05-0001-03

## Numerical Simulation on Cavity Growth in Uniaxial Tension of ZK60 Magnesium Alloy

YU Yan-dong<sup>1</sup>, FENG Juan<sup>1</sup>, JIANG Peng<sup>1</sup>, WANG Guo-jun<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology,

Harbin 150040, China; 2. Northeast Light Alloy Company Limited, Harbin 150086, China)

**Abstract:** In this paper, numerical simulation and experimental studies on the cavity growth were carried out in the case of uniaxial tension of ZK60 superplastic alloy. The mechanism of cavity growth in uniaxial tension process was analyzed to obtain the corresponding model. An exponentially increasing cavity growth model was introduced into this numerical simulation effectively. A three-dimensional rigid-viscoplastic finite element method (FEM) program has been developed to predict the variation of cavity radius and volume fraction. The values of cavity radius and volume fraction obtained by numerical simulation were in good agreement with experimental results.

**Key words:** ZK60 magnesium alloy; cavity radius; cavity volume fraction; numerical simulation

## 0 引言

镁合金是常用结构材料中最轻的一种. 它的比强度和比刚度高, 有良好的阻尼性<sup>[1-3]</sup>. 由于它的 HCP 晶体结构, 在室温下有效的滑移受到限制. 因此提高镁合金的工作温度可以促进滑移系的滑

移<sup>[4]</sup>. 镁合金超塑成形技术的应用吸引了许多研究者的注意, 关于镁合金超塑成形技术方面的工作正在开展<sup>[5-7]</sup>. 为了更多的了解有关超塑性单向拉伸过程中空洞长大特征, 本文通过光学显微镜和扫描电镜研究和了解空洞长大规律, 利用三维刚粘塑性有限元程序模拟预测了空洞尺寸和体积分数在镁合金单向拉伸过程中的演变规律.

收稿日期: 2009-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50875067); 哈尔滨市科技攻关项目 (2007AA1BE109)

作者简介: 于彦东 (1964—), 女, 博士后, 教授, 博士生导师, E-mail: yandongyu@yahoo.com.cn

## 1 基本控制方程

超塑性镁合金单向拉伸满足非牛顿粘性材料的要求并服从以下公式:

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\epsilon}}^{m-n}$$

其中:  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $K$  为材料常数;  $m$  为应变速率敏感指数;  $n$  为应变硬化指数;  $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}$  为等效应变和等效应变速率。

为了在超塑性变形过程中,既描述空洞损伤的影响,又描述厚向异性的影响,文[2]提出将 Hill 二次屈服方程和修正的 Gurson 方程有机地结合起来,描述超塑性板材屈服状态为

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - [2R/(1+R)] \sigma_1 \sigma_2 + 2\sigma_3^2}{2} + 2f_v^{A_1} \cosh \left( \frac{3}{2} A \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) - 1 - f_v^{2A_1} \right] = 0$$

其中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为板的平面内宏观主应力;  $\bar{\sigma}_1$  为材料平均流动应力;  $R$  为板材的厚向异性指数;  $A$  为平均应力;  $f_v$  为空洞体积分数;  $A_1 = \frac{1}{3}(2+m+n)$ 。

## 2 空洞长大模型

在近几十年超塑变形过程中,通过理论和数值分析获得空洞机理。然而空洞晶核、合并或连接在计算空洞长大时被忽略。根据内部状态变化不可逆过程的热力学理论,空洞演变公式为指数长大模型<sup>[8-9]</sup>为

$$f_v = k_0 \left[ \int_0^{\bar{\epsilon}} \exp \left( \frac{m}{3} \right) d\bar{\epsilon} \right]^{k_1}$$

其中  $k_0$ 、 $k_1$  为材料的特征常数。而特殊材料的拉伸,空洞体积演变公式为

$$f_v = f_0 \exp \left[ \left( \frac{m}{3} - \frac{p}{3} \right) \bar{\epsilon} \right] \\ r_v = r_0 \exp \left[ \left( \frac{m}{3} - \frac{p}{3} \right) \bar{\epsilon} \right] \\ = K \left[ \frac{m+p}{m} \right] \sinh \left[ 2 \left( \frac{2-m}{2+m} \right) \left( \frac{K_s}{3} - \frac{p}{3} \right) \right] \left[ \frac{D_{gb}}{d^2 kT} \right]$$

其中:  $f_0$  和  $f_v$  分别为初始变形和变形过程中的空洞体积分数;  $r_0$  和  $r_v$  分别为等效真应变分别为  $\bar{\epsilon}_0$  和  $\bar{\epsilon}_v$  的空洞半径;  $D_{gb}$  为晶界扩散系数;  $d$  为晶界宽度;  $d$  为晶粒尺寸;  $k$  为 Boltzmann 常数;  $T$  为绝对温度;  $p$  为空洞长大速率参数;  $K_s$  为原子体积;  $K_s$  为常数,取决于超塑性变形程度(单向拉伸  $K=1 \sim 2$ );  $p$  为附

加压力;  $\bar{\sigma}_e$  为等效单轴流动应力<sup>[10]</sup>。

## 3 模拟结果及分析

拉伸实验材料选用厚度为 1.0 mm 的 ZK60 合金。模拟材料的参数如下:材料常数  $K=564$ ,应变速率敏感指数  $m=0.51$ ,板材应变硬化指数  $n=0.08$ ,板材的厚向异性指数  $R=0.81$ ,最佳应变速率  $\dot{\bar{\epsilon}} = 5.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。运用 DEAS 软件对试样进行造型,拉伸试样被离散成 535 节点和 472 个四节点的等参单元。拉伸件初始网格划分如图 1 所示。其中模拟的延伸率分别为 140% 和 345% 时,空洞半径从 2.478 增加到 13.66,体积分数从 2.036 增加到 9.097,如图 2 所示,相对应的真应变分别为 0.87 和 1.48

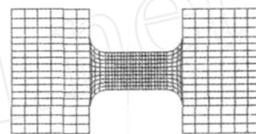


图 1 拉伸件初始网格划分

## 4 实验验证

选用厚度为 1.0 mm 镁合金板材作为实验材料,材料的平均晶粒尺寸为 5.9  $\mu\text{m}$ 。拉伸实验在 SHMADZU AG-1 250 kN 材料实验机上进行。在温度为 573K,应变速率为  $5.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  条件下,对试样进行拉伸直至断裂。实验结果表明,最大延伸率为 345% (如图 3)。通过光学显微镜和图像分析软件,观察不同变形阶段试样的空洞分布特征。图 4 为镁合金空洞长大及其分布情况的金相显微照片。

本文利用图像分析软件,对拉伸试样上 10 个视域进行金相观察并采集空洞特征数据,对测量结果进行统计、计算和分析,测定出不同变形阶段的拉伸试件平均空洞半径和体积分数。把实验获得的空洞半径和空洞体积分数与模拟结果进行比较。绘出图 5 为空洞半径和体积分数实验结果与模拟结果的对比曲线图。

从图 5 空洞半径、体积分数的模拟与实验结果曲线可以得出:当真应变为 1.48 时,模拟的空洞半径最大为 13.66  $\mu\text{m}$ ,体积分数为 9.09%,而对应实验条件下的实验结果为:空洞半径最大为 14.9  $\mu\text{m}$ ,体积分数为 9.3%。其实验数据与模拟结果在趋势上吻合良好。

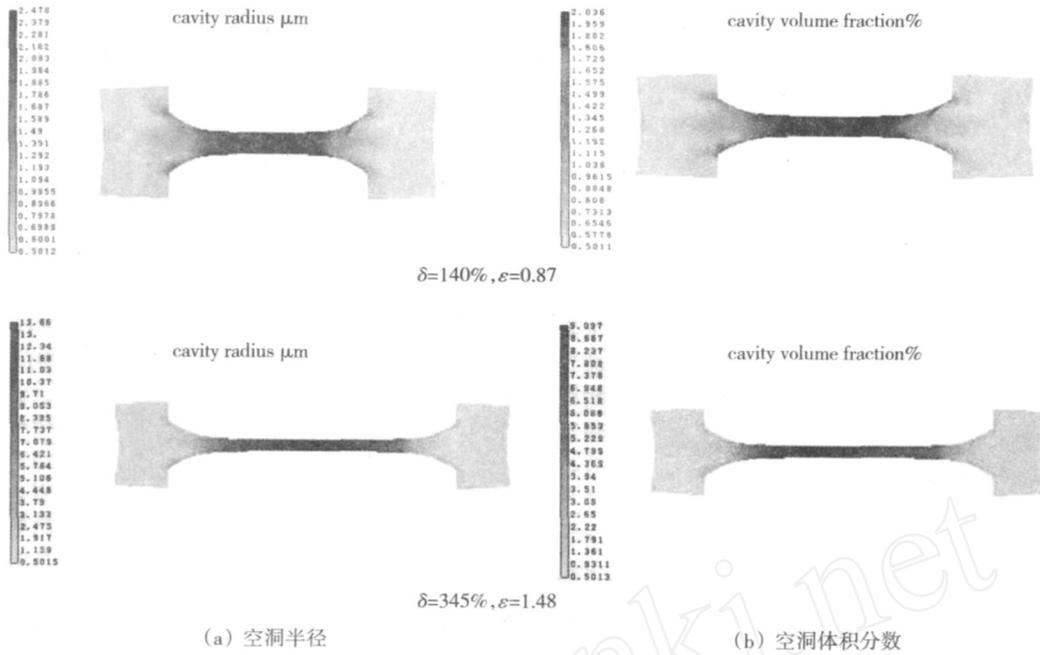


图 2 延伸率不同时空洞半径和体积分数模拟

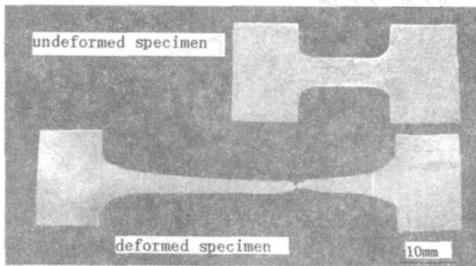


图 3 超塑性单向拉伸试样

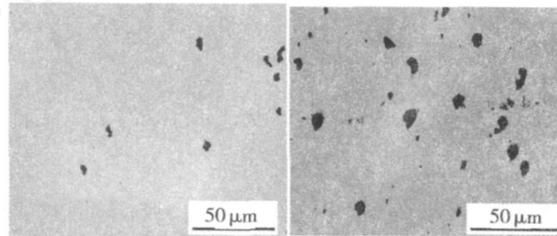


图 4 单向拉伸过程中空洞金相照片

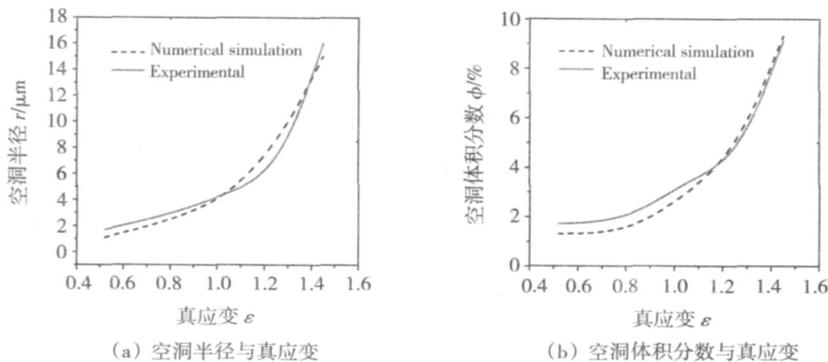


图 5 真应变与空洞半径和体积分数模拟结果与实验结果比较

因此,比较空洞生长特征的模拟结果与实验数据曲线,得出两曲线的空洞长大都随真应变呈指数递增,说明超塑性单向拉伸过程中,模拟结果曲线、实验数据曲线在数值上和趋势上吻合良好.数值模拟中采用的描述空洞生长的指数增长模型是合理的.

### 5 结 语

1) 利用三维刚粘塑性有限元方法,对 ZK60合金超塑单向拉伸过程中空洞长大进行数值模拟.模  
(下转第 7 页)

由于所谓的位错 - 障碍基本对相互结合的障碍不存在了,结合能减小的同时,滑移阻力也随之减小.这样在相同的应力作用下,位错滑移更容易进行,从而有利于再结晶的形核及长大,降低了再结晶发生的温度,并提高再结晶形核率,使材料的强度、硬度相应降低,塑性提高,最终达到了软化退火的目的.

### 3 结 语

1)实验结果表明,经过电脉冲处理后的钢丝,拉拔抗力明显降低,达到了退火软化的目的.

2)通过金相显微组织分析对脉冲退火工艺机理进行了探索性研究,发现脉冲电流的通入可以使再结晶形核的驱动力增大,且磁场的存在可以提高位错的滑移能力,有利于再结晶的形核及长大,这都将导致再结晶起始温度的降低.

3)脉冲电流退火工艺简单,加热时间短,提高金属材料的塑性指标明显.这种方法将为提高金属材料的性能开辟一条新的途径,对促进节能高效的新退火工艺发展将具有非常重要的意义.

(编辑:付长纓)

#### (上接第 3 页)

拟结果表明:在超塑单向拉伸过程中空洞半径和体积分数随着真应变的增加而增加,空洞长大模型呈指数增长模型;

2)将 ZK60 合金超塑单向拉伸过程中空洞长大的数值模拟结果和实验结果进行比较得出:当真应变为 1.48 时,模拟的空洞半径最大为 13.66  $\mu\text{m}$ ,体积分数为 9.09%,而对应实验条件下的实验结果为:空洞半径最大为 14.9  $\mu\text{m}$ ,体积分数为 9.3%. 其实验数据与模拟结果在趋势上吻合良好.

#### 参 考 文 献:

- [1] MOHR I T, MABUCH I M. Microstructural Evolution and Superplasticity of Rolled Mg-9Al-1Zn [J]. Material Science and Engineering A, 2000, 290: 139 - 144.
- [2] 吴诗 C. 金属超塑性变形理论 [M]. 北京:国防工业出版社, 1997. 51 - 52
- [3] WATANABE H, MUKA I T, N I I H G. Low Temperature Superplasticity in a ZK61 Magnesium-Based Composite[J]. Key Scripta Materialia, 2003, 42: 249 - 255
- [4] MOHR I T, MABNCA I I M, NAKAMNRA M, et al. Microstructure Evolution and Superplasticity of Rolled Mg-9Al-1Zn [J]. Materials

#### 参 考 文 献:

- [1] CONRAD H. Effects of Electric Current on Solid State Phase Transformations in Metals[J]. Mater Sci Eng, 2000, A287: 227 - 237.
- [2] YANG Di, CONRAD H. Exploratory Study into the Effects of an Electric Field and of High Current Density Electro Pulsing on the Plastic Deformation of TiAl [J]. Intermetallics, 2001 (9): 943 - 947.
- [3] 姚可夫,王沛玉. 脉冲电流对金属材料塑性变形和组织结构与性能的影响 [J]. 机械强度, 2003, 25 (3): 340 - 342
- [4] 付威际,古兵平,单凯军等. 退火温度对 CSP 基板冷轧冲压板再结晶温度和组织的影响 [J]. 材料热处理技术, 2008, 37 (8): 42 - 47.
- [5] 田绍权,徐卓辉,唐国翌. 电脉冲处理对冷拔铜丝组织与性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2006 (6): 102 - 104.
- [6] 田昊洋,唐国翌,丁 飞. 高能电脉冲处理对镁合金线材性能的影响 [J]. 有色金属, 2008 (4): 135 - 137.
- [7] 刘兴江,王建中,苍大强. 电脉冲处理对纯铜再结晶温度的影响 [J]. 热加工工艺 (热处理版), 2006 (5): 96 - 98.
- [8] 刘晓平,陈 强,杨 程. 电脉冲改善金属材料组织的应用现状 [J]. 铸造设备研究, 2008, 19 (4): 64 - 66.

(编辑:付长纓)

Science and Engineering A, 2003, 290: 139 - 144.

- [4] 王 敏,马彩霞. LY12 铝合金在超塑性变形中的空洞行为 [J]. 塑性工程学报, 2007 (1): 27 - 30.
- [5] 宋美娟,王智祥,汪凌云,等. 轧制镁合金板材超塑性变形时的空洞损伤行为 [J]. 有色金属学报, 2006 (4): 1 - 4.
- [6] WANG M, GUO H Z, LIU Y J. Cavity of Al-Cu-Mg Alloy During Superplastic Deformation [R]. Harbin, Harbin Institute of Technology (HIT), 2006.
- [7] XIANG Yi-bin, WU Shi-chun. Numerical Simulation of Cavity Damage Evolution in Superplastic Bulging Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 75: 224 - 330
- [8] WU H Y, CHU C H, SHEU S H, et al. Effect of Die Surface Roughness on Deformation Characteristics and Cavitation During Blow Forming in a Superplastic 5083 Alloy [J]. Materials Transactions, 2007, 48: 2483 - 2488.
- [9] SHAO J, GUO H P, LI Z Q, et al. Cavitation Behavior of Fine-grained 1420 Al-Li Alloy During Superplastic Deformation [R]. Harbin, Harbin Institute of Technology (HIT), 2006.
- [10] 卢志文,彭伟平,李培杰,等. AZ31 镁合金铸轧板材的热变形空洞演化行为 [J]. 中国有色金属学报, 2009 (5): 785 - 792.

(编辑:王 萍)