

文章编号: 1004-0609(2003)05-1171-04

## 铸态 ZA27 合金的压蠕变行为<sup>①</sup>

魏晓伟<sup>1, 2</sup>, 沈保罗<sup>1</sup>, 易 勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学 金属材料系, 成都 610065; 2. 四川工业学院 材料科学与工程系, 成都 610039)

**摘 要:** 采用自制的实验装置研究了铸态 ZA27 合金在常温及高温时的压蠕变行为。在温度为 20~160 ℃和压应力为 50~137.5 MPa 的范围内, 随温度和应力的升高, 合金的压蠕变量增大, 稳态蠕变速率的对数分别与应力和温度的对数曲线有较好的线性关系, 稳态蠕变速率符合半经验公式。在不同的温度下, 应力指数  $n$  相近, 平均值为 3.87; 不同的应力下, 表观激活能  $Q_a$  相差不大, 平均值为 83.73 kJ/mol, 材料结构常数  $A$  为 0.002, 稳态蠕变速率由锌的点阵扩散和位错的攀移所控制。

**关键词:** ZA27 合金; 压蠕变; 应力指数; 激活能

**中图分类号:** TG 111.8

**文献标识码:** A

ZA27 合金具有优良的室温力学性能, 其室温抗拉强度超过很多铝、青铜等铸造合金。因此, 近年来在工业中获得了一些应用, 但合金的高温性能较差, 如当温度升高到 150 ℃左右时, ZA27 合金的抗拉强度只有 160 MPa 左右。因而在如何提高 ZA27 合金的高温强度方面出现了较多的研究<sup>[1~6]</sup>, 在这些研究中, 大多数是关于高温短时拉伸强度的。也有研究者<sup>[7~10]</sup>研究了 Zn-Al-Cu 合金在受拉应力作用下的蠕变行为, 但就 ZA27 合金的构件而言, 处于受压状态是很普遍的, 压蠕变抗力就显得相当重要, 然而有关这方面的研究还很少见。因此, 本文作者通过自制的实验装置, 研究了 ZA27 合金在不同的应力和温度条件下的压蠕变行为, 以了解合金在受压状态时的压蠕变规律。

## 1 实验

### 1.1 材料

实验材料为 Zn-1 锌锭、Al-00 铝锭、Mg-2 镁锭、Cu-1 电解铜。将电解铜与工业纯铝配制成 Al-Cu50 中间合金, 再用电阻坩埚炉(SRJG-3-9)熔制 ZA27 合金, 把熔制好的合金浇铸成基尔试样(砂型)再加工成尺寸为  $d$  8 mm × 10 mm 的圆柱形试样, 随后进行压蠕变实验。熔炼后合金的化学成分见表 1。该合金  $\sigma_b$  为 410 MPa,  $\delta$  为 5.1%。合金的铸态组织和热处理时效后的组织(250 ℃时效 9 h,

再在 80 ℃时效 7 h)见图 1。合金在凝固过程中先结晶出枝晶状的富 Al 的  $\alpha$  相, 随后发生包晶转变生成富 Zn 的  $\beta$  相, 并分布于枝晶  $\alpha$  相的边缘, 在晶界处出现白亮色块状的  $\epsilon$  相(CuZn<sub>4</sub>)和深色的  $\eta$ + $\beta$ + $\epsilon$  三元共晶体(图 1(a))。时效处理后,  $\beta$  相分解成粗片状组织( $\alpha$ + $\eta$ ), 初生  $\alpha$  相中有  $\eta$  相析出(图 1(b))。

表 1 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZA27 alloy (mass fraction, %)

| Al     | Cu    | Mg    | Zn   |
|--------|-------|-------|------|
| 27.200 | 2.050 | 0.015 | Bal. |

### 1.2 实验方法

压蠕变实验在自制的实验装置上进行, 该装置由恒载荷加压装置、加热装置、温度控制装置、数据采集与记录装置组成(见图 2)。温度控制精度可达  $\pm 0.5$  ℃, 试样所产生的蠕变数据由位移传感器随时采集并由计算机记录, 精度为  $\pm 0.0001$  mm。压蠕变实验的温度分别为 20, 60, 100, 160 ℃, 压应力为 50.0, 87.5, 100.0, 137.5 MPa, 由此可获得 ZA27 合金在不同温度和压力下的蠕变参数。

## 2 分析与讨论

### 2.1 ZA27 合金的压蠕变曲线

① 收稿日期: 2002-07-09; 修订日期: 2002-11-17 作者简介: 魏晓伟(1963-), 男, 副教授, 博士研究生。  
通讯联系人: 魏晓伟, 副教授; 电话: 028-87721140; E-mail: weixiaowei90@hotmail.com

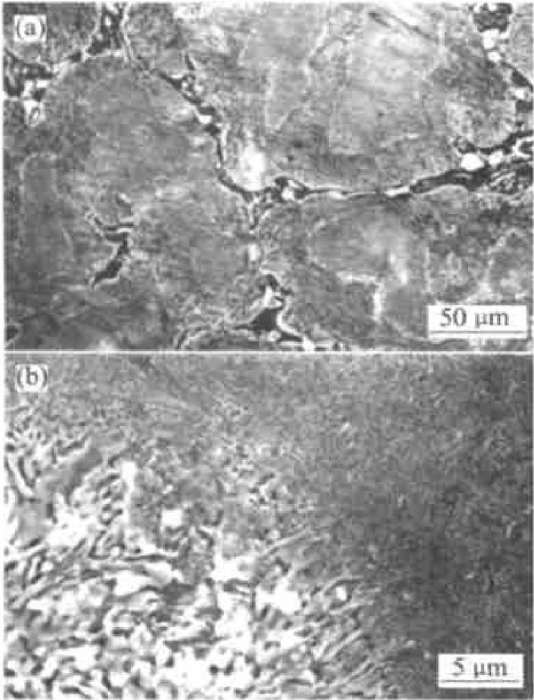


图 1 ZA27 合金的铸态及时效后的组织

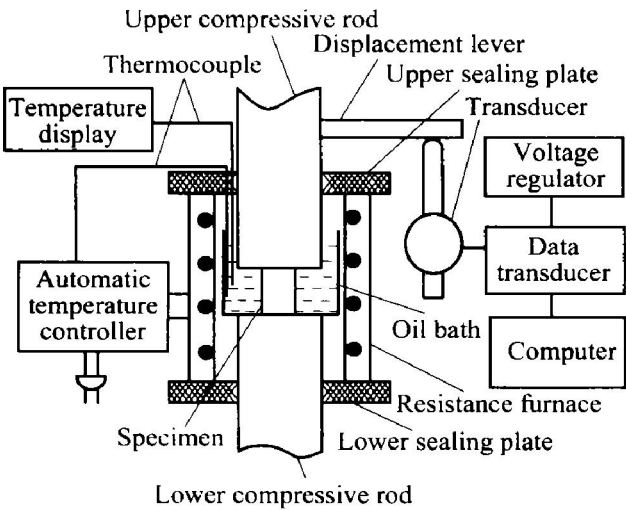


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

图 3 所示为 ZA27 合金在 100 ℃和 160 ℃的压蠕变的变化趋势。由图 3 可见，随温度的升高和压应力的增加合金压蠕变量增大，在 100 ℃和 160 ℃(50 MPa 和 87.5 MPa)有明显的稳态蠕变阶段(蠕变曲线的线性部分)。

2.2 ZA27 合金的稳态蠕变速率

由压蠕变曲线的线性部分得到 ZA27 合金压蠕变稳态蠕变速率  $\dot{\epsilon}_s$ ，结果见表 2。在一定温度下，将表 2 中的稳态蠕变速率与作用应力作双对数曲

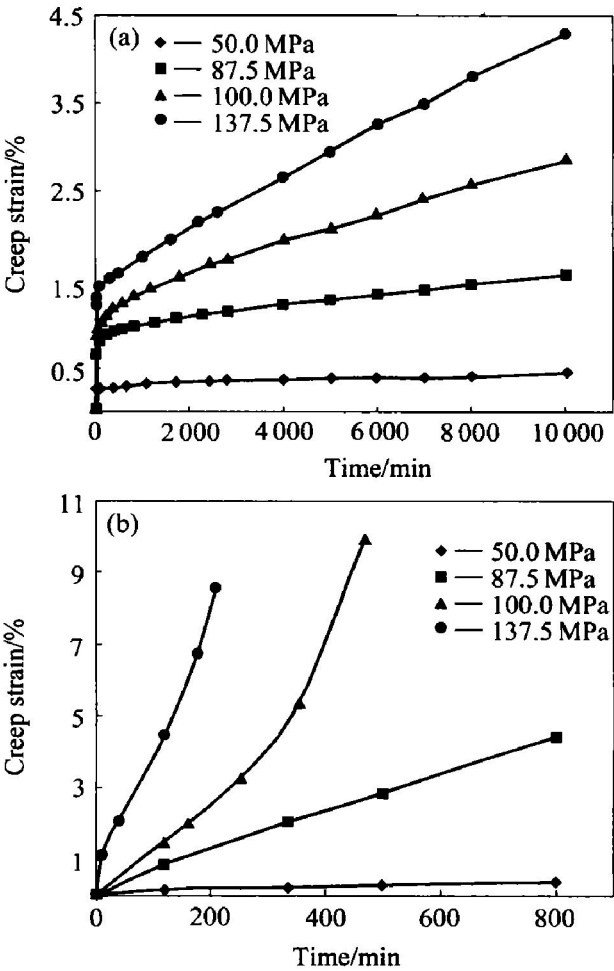


图 3 ZA27 合金的压蠕变曲线

Fig. 3 Compressive creep strain curves of ZA27 alloy (a) -100 ℃; (b) -160 ℃

表 2 ZA27 合金压蠕变的稳态蠕变速率

Table 2 Steady compressive creep rate of ZA27 alloy

| Temperature/ ℃ | Stress/ MPa | Steady creep rate ( $\dot{\epsilon}_s$ ) / s <sup>-1</sup> |
|----------------|-------------|------------------------------------------------------------|
| 20             | 50.0        | 4. 58 × 10 <sup>-9</sup>                                   |
|                | 87. 5       | 1. 63 × 10 <sup>-8</sup>                                   |
|                | 100. 0      | 8. 67 × 10 <sup>-7</sup>                                   |
|                | 137. 5      | 2. 51 × 10 <sup>-7</sup>                                   |
| 60             | 50. 0       | 3. 33 × 10 <sup>-7</sup>                                   |
|                | 87. 5       | 1. 05 × 10 <sup>-6</sup>                                   |
|                | 100. 0      | 3. 34 × 10 <sup>-6</sup>                                   |
|                | 137. 5      | 1. 83 × 10 <sup>-5</sup>                                   |
| 100            | 50. 0       | 4. 93 × 10 <sup>-6</sup>                                   |
|                | 87. 5       | 1. 36 × 10 <sup>-5</sup>                                   |
|                | 100. 0      | 8. 65 × 10 <sup>-5</sup>                                   |
|                | 137. 5      | 2. 02 × 10 <sup>-4</sup>                                   |
| 160            | 50. 0       | 3. 78 × 10 <sup>-4</sup>                                   |
|                | 87. 5       | 1. 47 × 10 <sup>-3</sup>                                   |
|                | 100. 0      | 4. 89 × 10 <sup>-3</sup>                                   |
|                | 137. 5      | 1. 79 × 10 <sup>-2</sup>                                   |

线, 结果如图 4 所示。图 4 所示为不同温度时  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和  $\ln \sigma$  之间的线性关系。将表 2 中的稳态蠕变速率的对数与温度 ( $1/T$ ) 作图而得到图 5, 图 5 所示为  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和  $1/T$  之间的线性关系。

在作用应力不大时, 可用式 (1) 表示稳态蠕变速率与温度和应力的关系<sup>[11]</sup>

$$\dot{\epsilon}_s = A \sigma^n \exp[-Q_a/(RT)] \quad (1)$$

式中  $A$  为与合金成分及组织有关的材料结构常数;  $\sigma$  为作用应力;  $n$  为名义蠕变应力指数;  $R$  为摩尔气体常数;  $Q_a$  为表观蠕变激活能;  $T$  为绝对温度。

将式 (1) 两边取对数得到

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln A + n \ln \sigma - Q_a/(RT) \quad (2)$$

当温度不变时,  $\ln A - Q_a/(RT) = K$ ,  $K$  为常数, 则

$$\ln \dot{\epsilon}_s = K + n \ln \sigma \quad (3)$$

当应力不变时,  $\ln A + n \ln \sigma = K'$ ,  $K'$  为常数, 则

$$\ln \dot{\epsilon}_s = K' - Q_a/(RT) \quad (4)$$

式 (3) 表示温度不变时  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和  $\ln \sigma$  的直线关系, 具有斜率  $n$ ; 式 (4) 表示应力不变时  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和 ( $1/T$ ) 的直线关系, 其斜率为  $-Q_a/R$ 。若实验合金的压蠕变满足式 (1), 则在恒定温度时,  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和  $\ln \sigma$  之间, 以及恒定应力时,  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和 ( $1/T$ ) 之间均应有直线关系。从图 4 和图 5 可见, ZA27 的稳态压蠕变速率  $\ln \dot{\epsilon}_s$  与应力  $\ln \sigma$  和 ( $1/T$ ) 有直线关系, 由此可得到应力指数  $n$  分别为 3.97(20 °C), 3.87(60 °C), 3.82(100 °C), 3.81(160 °C), 平均值为 3.87; 表观激活能  $Q_a$  分别为 84.58(50 MPa), 84.28(87.5 MPa),

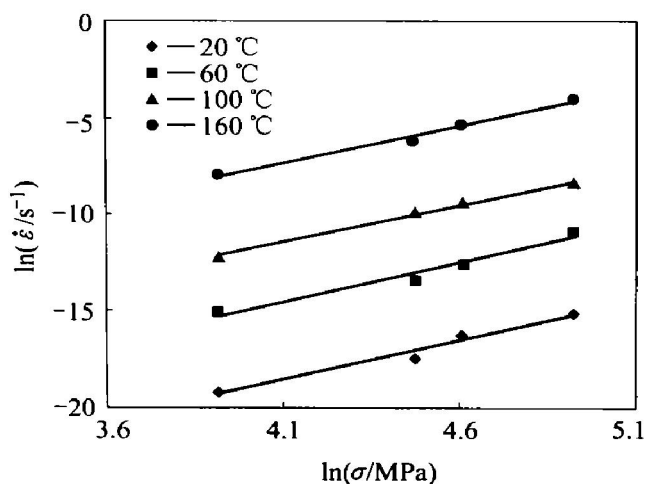


图 4 稳态蠕变速率与应力的双对数曲线

Fig. 4 Relationship between steady creep rate and compressive stress

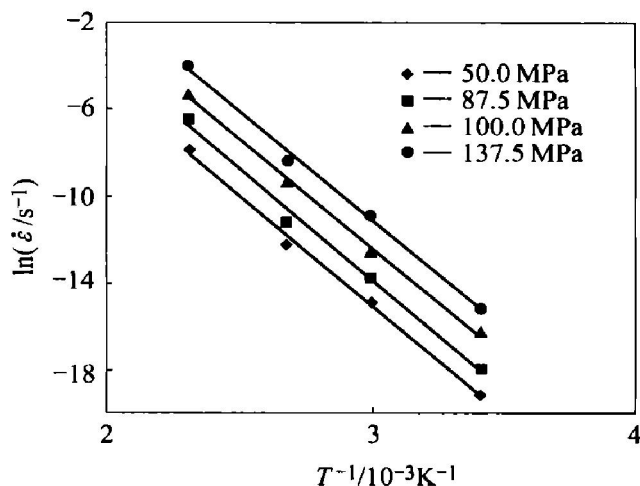


图 5 稳态蠕变速率与温度的关系

Fig. 5 Relationship between steady creep rate and temperature

83.15(100 MPa), 82.89(137.5 MPa), 平均值为 83.73 kJ/mol。应力指数  $n$  在 3~5 之间, 激活能  $Q_a$  与锌的点阵自扩散激活能(91.3 kJ/mol)<sup>[12]</sup> 相差不大, 由此可认为 ZA27 合金的压蠕变速率由锌的自扩散和位错的攀移过程所控制<sup>[13]</sup>。

当应力指数  $n$  和激活能  $Q_a$  的值确定后, 由式 (2) 将 ZA27 合金在整个应力和温度范围内的压蠕变速率的变化表示为  $\ln \dot{\epsilon}_s$  和  $[n \ln \sigma - Q_a/(RT)]$  的关系(见图 6), 由此得到材料的结构常数  $A = 0.002$ , 合金的稳态蠕变速率与温度和应力的关系则表示为  $\dot{\epsilon}_s = 0.002 \sigma^{3.87} \exp[-83730/(RT)]$ 。  $A$  决定了直线在图中的位置, 可推知, 若改变 ZA27 合金的成分及组织, 直线的位置随之而变, 在温度和应力不变的情况下, 当直线向上移动时, 合金的蠕变速率增大, 反之, 则减小。

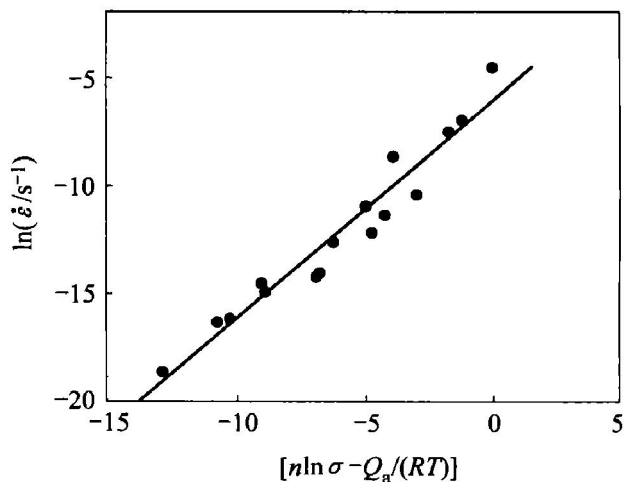


图 6  $\ln \dot{\epsilon}_s$  与  $[n \ln \sigma - Q_a/(RT)]$  的关系

Fig. 6 Relationship between  $\ln \dot{\epsilon}_s$  and  $[n \ln \sigma - Q_a/(RT)]$

## REFERENCES

- [1] Lo S H J, Dionne S, Sahoo M, et al. Mechanical and tribological properties of zinc-aluminium metal-matrix composites[J]. J Materials Science, 1992, 27(21): 5681-5691.
- [2] Anwaqr M, Murphy S. Comparative load-relaxation behavior of high aluminum zinc-based alloys[J]. J Materials Science, 2001, 36(2): 411-417.
- [3] 苏德煌. 锂对 ZA27 合金高温力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 1998, 6(6): 26-27.  
SU De-huang. Effect of Li on mechanical properties at high temperature for ZA27 alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloy, 1998, 6(6): 26-27.
- [4] 赵沛廉, 张金山. 添加锰对 ZA27 合金高温力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 1996, 4(3): 34-37.  
ZHAO Pei-lian, ZHAN Jin-shan. Effect of Mn added on the high temperature properties of ZA27 alloys[J]. Material Science and Technology, 1996, 4(3): 34-37.
- [5] 苏德煌. 添加铁和锰对 ZA27 合金高温拉伸性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(3): 52-55.  
SU De-huang. Effect of Fe and Mn added on high temperature tensile properties of ZA27 alloy[J]. Material Science and Technology, 1998, 6(3): 52-55.
- [6] ZHANG Li-ming, DING Zhi-min, LAO Bin. High temperature creep property of silicon particles reinforced high Al Zr-based alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(3): 519-523.
- [7] Durman M, Murphy S. An improved parametric method for the correlation of creep data from commercial pressure-diecast zinc-based alloy[J]. Z Metallkd, 1991, 82(2): 129-134.
- [8] Savaskan T, Murphy S. Creep behavior of Zr-Al-Cu bearing alloy[J]. Z Metallkd, 1983, 74(2): 76-82.
- [9] Murphy S, Durman M, Hill J. Kinetics of creep in diecast commercial zinc-aluminium alloys[J]. Z Metallkd, 1988, 79(4): 243-247.
- [10] Zhu Y H, Orozco E, Torres J. Tensile creep deformation and microstructure change in cast Zr-Al alloy[J]. J Materials Transactions, 1997, 38(6): 521-525.
- [11] 冯端. 金属物理(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1975. 799-800.  
FENG Duan. Metal Physics II[M]. Beijing: Science Press, 1975. 799-800.
- [12] Prasad N, Malakondaiah G, Banerjee D, et al. Low-stress creep behavior of superplastic Zr-22% Al alloy[J]. J Materials Science, 1993, 28(6): 1585-1594.
- [13] Soliman M S, Box P O. The high-temperature creep behaviour of an Al-1% Cu solid-solution alloy[J]. J Materials Science, 1993, 28(16): 4483-4488.

## Compressive creep behavior of as-cast ZA27 alloy

WEI Xiao-wei<sup>1, 2</sup>, SHEN Bao-luo<sup>1</sup>, YI Yong<sup>1</sup>

(1. Department of Metal Materials, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Sichuan Institute of Technology, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** The compressive creep behavior of an as-cast ZA27 alloy was investigated at room and high temperatures in the range of 20~160 °C and different compressive stress in the range of 50~137.5 MPa with special apparatus. The results show that the creep increases with increasing temperature and compressive stress. There is linear logarithmic relationship between the steady creep rate and all the temperature and stress used. The steady creep rate obeys an empirical equation. The stress exponents at different temperatures are similar, i. e. 3.97(20 °C), 3.87(60 °C), 3.82(100 °C) and 3.81(160 °C). And the appearance activation energies under different stresses are not greatly different, i. e. 84.58, 84.28, 83.15 and 83.89 kJ/mol. The average values, stress exponent and activation energy, are 3.87 and 83.73 kJ/mol respectively. Materials constant  $A$  is 0.002. The steady creep rate of the experimental alloy is controlled by lattice diffusion in zinc or by a dislocation climb.

**Key words:** ZA27 alloy; compressive creep; stress exponent; activation energy

(编辑 陈爱华)