

DOI: 10.3901/JME.2009.03.291

高温低应力下 AZ31 镁合金的蠕变性能及蠕变机理*

张诗昌 宗 钦 胡衍生 程晓茹

(武汉科技大学钢铁冶金与资源利用教育部重点实验室 武汉 430081)

摘要: 研究了 AZ31 镁合金在高温、低应力下的蠕变性能及蠕变机理。结果表明, AZ31 镁合金的高温蠕变具有明显的三阶段蠕变特征; 随着温度和应力的增加, 稳态蠕变速率增加, 稳态蠕变速率区域缩短。温度大于 420 °C、较低应力时, AZ31 镁合金的蠕变为晶界扩散控制的 COBLE 蠕变; 较高应力时, 与位错攀移控制的 WEETMAN 蠕变机制相吻合。当温度为 320~420 °C 时, AZ31 镁合金的蠕变为滑移控制的位错蠕变。计算了由 COBLE 蠕变向 WEETMAN 蠕变转变的临界应力 σ_{cr} , 该应力与 P-N 力 τ_p 在数值上具有如下关系: $\sigma_{cr} \approx (2 \sim 3)\tau_p$ 。

关键词: AZ31 镁合金 高温蠕变 蠕变机理

中图分类号: TG113.2

Creep Property and Mechanism of AZ31 Magnesium Alloy under High Temperature and Low Stress

ZHANG Shichang ZONG Qin HU Yansheng CHENG Xiaoru

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization, Ministry of Education,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: The creep property and mechanism of AZ31 magnesium alloy under high temperature and low stress is investigated. The results show that the creep curve presents obviously the three stages creep characteristic. The creep rate increases and the static creep stage shortens with increasing temperature and stress. When temperature is above 420 °C, the creep of AZ31 magnesium alloy under lower stress is COBLE creep controlled by grain boundary diffusion of magnesium; however, at higher stress the creep accords with WEETMAN creep controlled by dislocation climb. The creep of AZ31 magnesium alloy is controlled by dislocation glide at temperature ranging from 320~420 °C. The critical stress σ_{cr} , which results in changing from COBLE creep to WEETMAN creep is calculated, the magnitude of σ_{cr} and the Nabarro-Peieris stress τ_p has the relation as follows: $\sigma_{cr} \approx (2 \sim 3)\tau_p$.

Key words: AZ31 magnesium alloy High temperature creep Creep mechanism

0 前言

AZ31 镁合金具有中等强度、较高的耐腐蚀性能和较好的塑性加工性能, 是有着广泛应用前景的一类工业用变形合金^[1-4]。近年来, 国内外学者对 AZ31 镁合金的高温蠕变进行了研究, 得到了一些重要结论。田素贵等^[5]研究了温度为 200 °C, 应力在 50 MPa 条件下, AZ31 镁合金蠕变初期的变形机制及组织特点。WATANABE 等^[6]研究了 AZ31 镁合

金在 325~400 °C 温度下的变形规律, 并建立了应变速率与应力、温度间的本构关系, 结果表明应力指数为 $n=3$, 变形激活能 $Q=143$ kJ/mol。同样 SPIGARELLI 等^[7]也建立了 AZ31 镁合金在 250~400 °C 温度下的高温变形本构方程, 但结果与 WATANABE 有较大出入, 其应力指数为 4, 变形激活能为 155 kJ/mol。

关于 AZ31 镁合金在 400 °C 温度以上、低应力条件下的蠕变规律, 目前尚未见相关研究报道。然而, 了解高温、低应力下的蠕变特点, 建立蠕变速率与温度、应力间的本构关系对于掌握 AZ31 镁合金的高温变形规律, 特别是超塑性变形规律具有指

* 湖北省教育厅重点资助项目(Z200511007)。20080310 收到初稿, 20081020 收到修改稿

导意义, 因为 AZ31 镁合金的塑性加工, 特别是超塑性成型往往在高温、低应力条件下进行。而超塑性变形机理通常与高温蠕变机理有本质或内在联系^[8-9]。

1 试验过程

试验材料为挤压态 AZ31 工业镁合金, 等离子光谱分析镁合金化学成分, 结果如表 1 所示。

表 1 AZ31 镁合金化学成分的质量分数 %

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu
2.750	0.998	0.458	0.050	0.004	0.008

合金的金相组织如图 1 所示。AZ31 镁合金的组成相为 α -Mg, 以及晶界上分布的 $Mg_{17}Al_{12}$ 。晶粒尺寸约为 $50 \mu\text{m}$ 。

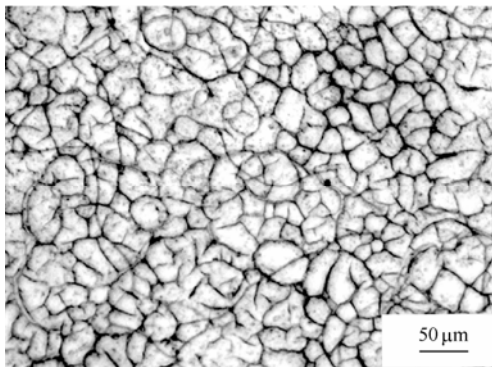


图 1 AZ31 镁合金的显微组织

高温蠕变试验在 GWTA 电子式高温蠕变试验机上进行, 该试验机的炉膛均热带长度大于 150 mm , 温度误差小于 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。蠕变试样按照 GB2039-1997 标准加工而成。

蠕变拉伸温度在 $320 \sim 480 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内选取。每一温度下施加恒定应力, 应力在 $4 \sim 15 \text{ MPa}$ 范围内, 低温取较大值, 高温取较小值, 以保证具有恒定蠕变阶段。加载前将试样在试验温度下预热 15 min 。绘制时间—应变蠕变曲线, 根据蠕变曲线数据确定稳态蠕变速率。对蠕变断裂试样的断口分析在 CXA-733 电子显微镜上进行。

2 试验结果及分析讨论

2.1 温度和应力对 AZ31 镁合金蠕变曲线的影响

选取几个有代表性的蠕变温度和蠕变应力, 分析温度和应力对蠕变曲线的影响。图 2 所示为 360 、 390 、 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的蠕变温度下, 恒定应力为 7.82 MPa 时, 归一化时间—蠕变速率($t/t_f - \dot{\epsilon}$)曲线。 t_f 为试

样断裂时间。

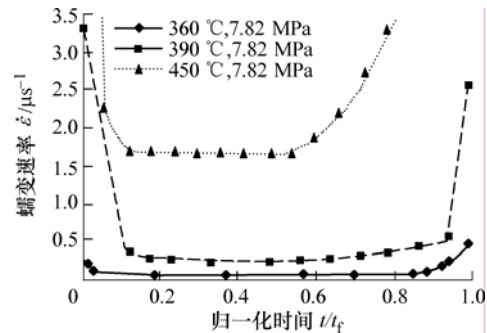


图 2 温度对 AZ31 镁合金蠕变曲线 $t/t_f - \dot{\epsilon}$ 的影响

由图 2 可知: 当应力不变时, 随着温度增高, 蠕变速率增加, 稳态蠕变速率也相应增加, 并且稳态蠕变速率区域缩短。这是由于温度的增加, 导致了 Mg 原子的扩散系数增大, 以扩散为主的蠕变过程加快, 所以蠕变速率增加。

当蠕变温度恒定为 $360 \text{ }^\circ\text{C}$, 应力分别为 5.34 、 7.82 、 12.30 MPa 时, 归一化时间—蠕变速率($t/t_f - \dot{\epsilon}$)曲线如图 3 所示。由图 3 可知: 随着应力增加, 蠕变速率增加。

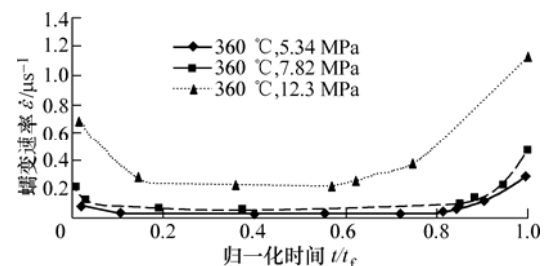


图 3 应力对 AZ31 镁合金蠕变曲线($t/t_f - \dot{\epsilon}$)的影响

图 4 所示为 AZ31 镁合金 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 蠕变断裂后的 SEM 断口照片。该断口具有较明显的韧窝特征, 属于塑性断裂。但断面上存在许多大小不一的空洞。这是由于在 AZ31 镁合金中, 元素 Zn 的熔点为 $419 \text{ }^\circ\text{C}$, 第二相 $Mg_{17}Al_{12}$ 的熔点为 $437 \text{ }^\circ\text{C}$, 均低于 $450 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此固溶在合金基体中的 Zn 和分布在晶界上的 $Mg_{17}Al_{12}$ 都处于熔融状态, 在外力作用下容易产生撕裂, 形成微小空洞, 当空洞不断扩展, 连成一片时最终导致断裂。

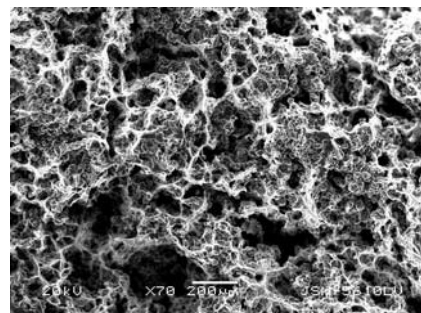


图 4 AZ31 镁合金 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 蠕变断裂后的 SEM 断口

2.2 温度和应力对 AZ31 镁合金稳态蠕变速率-蠕变应力关系的影响

温度分别为 320、360、390、420、450、480 °C, 应力在 4.00~15.05 MPa 时, AZ31 镁合金的稳态蠕变速率与蠕变应力关系如图 5 所示。

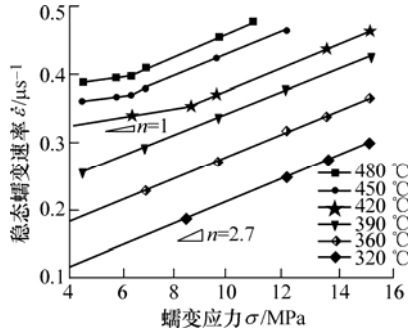


图 5 AZ31 镁合金蠕变应力与稳态蠕变速率关系

由图 5 可以看出: ① 应力一定, 随着温度升高, 稳态蠕变速率增加。温度一定, 稳态蠕变速率随着应力升高而增加。② 温度为 320~390 °C 时, AZ31 镁合金稳态蠕变速率随应力变化的指数为一个常数, 即 $n=2.7$ 。③ 温度为 420~480 °C 时, AZ31 镁合金稳态蠕变速率随应力变化的指数出现两段不同数值。低应力时, $n=1$, 高应力时, $n=2.7$ 。

2.3 温度和应力对 AZ31 镁合金高温蠕变激活能的影响

蠕变激活能是反映蠕变机理的重要参数。将实际蠕变激活能与扩散激活能比较, 可以分析蠕变过程主要是因为晶格扩散或者是晶界扩散所引起。当应力不变时, 蠕变激活能的计算公式如下^[10]

$$Q = R \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \right) \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right) \quad (1)$$

式中 $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ 分别为温度 T_1 、 T_2 下的稳态蠕变速率; R 为气体常数。

只要试验测定某一恒定应力下, 温度 T_1 、 T_2 时的稳态蠕变速率, 按照式(1)可以计算出蠕变激活能。分别测定了两类应力, 即较低应力(4.0 MPa)和较高应力(7.8 MPa)下, 320~480 °C 温度范围内各较小温度区间的稳态蠕变速率, 并按式(1)计算得到蠕变激活能, 结果如图 6 所示。

温度为 420~480 °C, 应力 4.0 MPa 时, 蠕变激活能分别为 $Q_{420\sim450\text{ °C}}=93.2$ kJ/mol, $Q_{450\sim480\text{ °C}}=90.8$ kJ/mol, 与 Mg 的晶界扩散激活能(92 kJ/mol)相当, 同样温度下, 应力为 7.8 MPa 时, 蠕变激活能分别为 $Q_{420\sim450\text{ °C}}=133.4$ kJ/mol, $Q_{450\sim480\text{ °C}}=131.7$ kJ/mol, 与 Mg 的晶格自扩散激活能(135 kJ/mol)相当。

当温度为 320~420 °C, 应力为 4.0 MPa 时, 蠕变激活能分别为 $Q_{320\sim360\text{ °C}}=142.5$ kJ/mol, $Q_{360\sim390\text{ °C}}=$

144.0 kJ/mol, $Q_{390\sim420\text{ °C}}=146.3$ kJ/mol; 同样温度下, 应力为 7.8 MPa 时, 蠕变激活能分别为 $Q_{320\sim360\text{ °C}}=143.2$ kJ/mol, $Q_{360\sim390\text{ °C}}=144.6$ kJ/mol, $Q_{390\sim420\text{ °C}}=145.2$ kJ/mol, 与 Al 在 Mg 中的溶质扩散激活能(143 kJ/mol)相当。

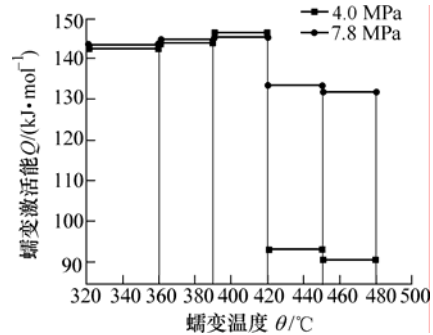


图 6 AZ31 镁合金蠕变激活能

2.4 AZ31 镁合金高温蠕变机理探讨

描述稳态蠕变速率与应力、温度等参数之间关系的本构方程是大家较为认可的 DORN 公式^[8], 其表达式如下

$$\dot{\epsilon} = A \frac{D_0 G b}{KT} \left(\frac{b}{d} \right)^P \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \quad (2)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为稳态蠕变速率, G 为切变模量, b 为伯格矢量, K 为玻尔兹曼常数, D_0 为扩散常数, d 为晶粒直径, σ 为外加应力, n 为应力指数, Q 为扩散激活能, R 为气体常数, A 、 P 为与合金组织有关的常数。

因为在所研究的温度区间和应力范围内, AZ31 镁合金的晶粒大小变化不显著, 因此将晶粒尺寸 d 视为常数, 同时将切变模量 G 看作常数, 故式(2)可以简化为

$$\dot{\epsilon} = \frac{B}{T} \sigma^n \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \quad (3)$$

式中 B 为与合金组织结构有关的常数。将试验得到的稳态蠕变速率以及应力和温度值代入式(3)中, 可以求得 B 、 n 、 Q 值, 从而得到相应温度和应力条件下的稳态蠕变速率本构方程, 结合已有的蠕变理论, 分析 AZ31 镁合金各阶段的蠕变机理。

2.4.1 温度大于 420 °C、较低应力时, AZ31 镁合金的蠕变机理

从图 5 可知: 当温度大于 420 °C 时, 随着应力变化, 应力指数发生变化。应力较小时, 应力指数 $n=1$ 。

关于高温、低应力下, 应力指数 $n=1$ 的蠕变机理, 目前已知的有三种, 即 NABARRO—HERRING 蠕变; COBLE 蠕变以及 HAMPER-DORN 蠕变^[11]。前两者为扩散型蠕变, 即蠕变是由于晶内扩散或晶

界扩散引起。而后者为位错攀移控制的蠕变。NABARRO—HERRING 蠕变和 HAMPER-DORN 蠕变的蠕变激活能均与 Mg 的自扩散激活能(135 kJ/mol)相当,而 COBLE 蠕变的蠕变激活能为 Mg 的晶界扩散激活能(92 kJ/mol)。

将相关试验结果代入式(3),求得 AZ31 镁合金在温度为 420~480 °C、应力较小时的蠕变速率如下

$$\dot{\epsilon} = \frac{2.57 \times 10^4}{T} \sigma \exp\left(\frac{-92\,000}{RT}\right) \quad (4)$$

由式(4)可知:AZ31 镁合金的蠕变激活能即为镁合金的晶界扩散激活能。与试验得到的蠕变激活能数值(图 6)相当。式(4)就是 COBLE 蠕变数学模型的具体表达形式。因此可以确定 AZ31 镁合金的蠕变为由晶界扩散所控制的 COBLE 蠕变。

2.4.2 温度大于 420 °C、较高应力时, AZ31 镁合金的蠕变机理

当温度大于 420 °C,较高应力时,应力指数 $n=2.7$,见图 5 所示。同样将相关试验数据代入式(3)中,得到 AZ31 镁合金蠕变速率与应力、温度之间的关系。

$$\dot{\epsilon} = \frac{1.6 \times 10^6}{T} \sigma^{2.7} \exp\left(\frac{-135\,000}{RT}\right) \quad (5)$$

式中,蠕变激活能为 Mg 的晶格扩散激活能,应力指数接近 3,与 WEETMAN 蠕变^[8]较吻合,因此属于位错攀移控制的蠕变机制。高温下, Mg 原子的扩散系数增高,加剧了晶格扩散,使得位错攀移变得容易,因此在一定应力作用下,位错攀移在蠕变过程中占据主导地位。

2.4.3 温度小于 420 °C, AZ31 镁合金的蠕变机理

从图 5 中的曲线可以看出:温度小于 420 °C,在所试验的应力范围之内,应力指数均为 $n=2.7$ 。同理,将相关试验数据代入式(3)中,得到 AZ31 镁合金的蠕变速率与应力、温度之间的关系

$$\dot{\epsilon} = \frac{10^7}{T} \sigma^{2.7} \exp\left(\frac{-143\,000}{RT}\right) \quad (6)$$

蠕变激活能 $Q=143$ kJ/mol,为 Al 在 Mg 中的自扩散激活能,与试验得到的蠕变激活能相当,应力指数接近 3,属于位错滑移控制的蠕变机制。WATANABE 等^[6]对 AZ31 镁合金超塑性试验结果也表明:当温度为 325~400 °C 时,超塑性应变为由滑移控制的位错蠕变,应变激活能即为 Al 在 Mg 中的自扩散激活能。

2.4.4 AZ31 镁合金由 COBLE 蠕变向位错攀移的 WEETMAN 蠕变转变的临界应力

温度为 420~480 °C 时,随着应力增加,蠕变机制由 COBLE 扩散蠕变向位错攀移蠕变转变。由图

5 可知:不同温度对应一个不同临界转变应力 σ_{cr} 。令式(4)等于式(5),可以得到各温度下临界转变应力 σ_{cr} ,结果如表 2 所示。随着温度的升高,临界应力降低。这是因为温度越高, Mg 原子的扩散越快,克服位错运动的阻碍所需的应力越小,因此产生位错攀移的应力也越小。

表 2 三种温度下由 COBLE 蠕变向 WEETMAN 蠕变转变的临界应力

温度 $\theta/^\circ\text{C}$	临界应力 σ_{cr}/MPa
420	7.0
450	5.8
480	4.9

将临界应力与 Mg 的 P-N 力比较可以得到两者之间在数值上的比例关系。根据 P-N 力计算公式

$$\tau_p = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(\frac{-2\pi d}{(1-\nu)b}\right) \quad (7)$$

式中, d 为密排原子面间距; ν 为泊松比,对于 Mg, $\nu=0.33$; b 为密排方向原子间距,数值上等于晶格常数。将相关参数代入式(7)中,得到 Mg 的 P-N 力, $\tau_p=2.5$ MPa。与表 2 中临界应力 σ_c 比较可知

$$\sigma_{cr} \approx (2\sim 3)\tau_p \quad (8)$$

3 结论

(1) AZ31 镁合金的高温蠕变具有明显的三阶段蠕变特征;随着温度和应力的增加,稳态蠕变速率增加,稳态蠕变速率区域缩短。

(2) 温度大于 420 °C、较低应力时, AZ31 镁合金的蠕变为晶界扩散控制的 COBLE 蠕变,应力指数 $n=1$,蠕变激活能为 Mg 的晶界扩散激活能。较高应力时,与 WEETMAN 蠕变较吻合,属于位错攀移控制的蠕变机制,应力指数 $n=2.7$,蠕变激活能与 Mg 的晶格扩散激活能相当。温度小于 420 °C, AZ31 镁合金的蠕变为滑移控制的位错蠕变,应力指数 $n=2.7$,蠕变激活能与 Al 在 Mg 中的自扩散激活能相当。

(3) 温度大于 420 °C 时, AZ31 镁合金由 COBLE 蠕变向 WEETMAN 蠕变转变的临界应力在数值上与 P-N 力具有如下关系: $\sigma_{cr} \approx (2\sim 3)\tau_p$ 。

参 考 文 献

- [1] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
DING Wenjiang. Magnesium science and technology [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] 潘复生, 韩恩厚. 高性能变形镁合金及加工技术[M].

- 北京: 科学出版社, 2007.
- PAN Fusheng, HAN Enhou. High quality wrought magnesium alloys and process technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] 郭强, 严红革, 陈振华. AZ31 镁合金高温热压缩变形特性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 900-906.
- GUO Qiang, YAN Hongge, CHEN Zhenhua. Hot compression deformation behavior of AZ31 magnesium alloy at elevated temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 900-906.
- [4] 张华, 吴林, 林三宝. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 123-126.
- ZHANG Hua, WU Lin, LIN Sanbao. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 123-126.
- [5] 田素贵, 孙根荣, 徐永波. AZ31 镁合金蠕变初期的变形特征[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 375-379.
- TIAN Sugui, SUN Genrong, XU Yongbo. Deformation features of AZ31 Mg-alloy in initial period of high temperature creep[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(4): 375-379.
- [6] WATANABE H, TSUTSUI H, MUKAI T. Deformation mechanism in a coarse grained Mg-Al-Zn alloy at elevated temperature[J]. International Journal of Plasticity, 2001, 17: 387-397.
- [7] SPIGARELLI S, EL MEHTEDI M, CABIBBO M. Analysis of high-temperature deformation and microstructure of an AZ31 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A462: 197-201.
- [8] MUKHERJEE A K. An examination of the constitutive equation for elevated temperature plasticity[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A322: 1-22.
- [9] NABARRO F R N. Creep in commercially pure metals[J]. Acta Materialia, 2006, 54: 263-295.
- [10] VAGARALI S S, LANDON T G. Deformation mechanisms in H.C.P metals at elevated temperatures-I. Creep behavior of magnesium[J]. Acta Metallurgica, 1981, 129: 1969-1982.
- [11] OWEN DAVID M, LANDON T G. Low stress creep behavior: An examination of Nabarro-Herring and Harper-Dorn creep[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A216: 20-29.
-
- 作者简介: 张诗昌(通信作者), 男, 1962年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为镁合金成形理论与技术。
- E-mail: s.c.hust@163.com