

T6 处理对 AZ80-Ag 镁合金环轧件 拉伸及蠕变性能的影响

张冬冬, 刘楚明, 曾 钢, 万迎春, 张宗良, 蒋树农

(中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要:应用热环轧技术制备出大尺寸的 AZ80-Ag 镁合金环轧件,利用扫描电子显微镜 (SEM)、拉伸蠕变等试验方法,系统研究了 T6 热处理对环轧件拉伸和蠕变性能的影响。结果表明:热环轧后,环轧件内部大部分晶粒为动态再结晶晶粒,并在晶界上分布有少量析出相;经 T6 处理后,在晶界和晶粒内部析出 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相,使合金屈服强度和抗拉强度明显提高;合金的蠕变速率经 T6 处理后降低,变形态和 T6 态的应力指数 n 分别为 4.1 和 5.5,对应的蠕变机制为位错滑移和攀移。

关键词:镁合金;T6 热处理;蠕变性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20190617

中图分类号: TG166.4;TG111.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)20-0155-04

Effects of T6 Treatment on Tensile and Creep Properties of AZ80-Ag Magnesium Alloy by Hot Ring Rolling

ZHANG Dongdong, LIU Chuming, ZENG Gang, WAN Yingchun,

ZHANG Zongliang, JIANG Shunong

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Large size AZ80-Ag magnesium alloy ring rolled pieces were prepared by hot ring rolling technology. The effects of T6 heat treatment on tensile and creep properties of the ring rolled pieces were systematically studied by means of scanning electron microscope (SEM), tensile creep and other test methods. The results show that, after hot ring rolling, most of the inner grains are dynamic recrystallization grains, and a small amount of precipitated phase is distributed on the grain boundary. After T6 treatment, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ phase is precipitated at grain boundary and inside the grain. The yield strength and tensile strength of the alloy are obviously improved by the strengthened phase in the Mg-Al alloy. The creep rate of the alloy decreases after T6 treatment. The stress indices n of the alloy in deformed state and T6 state are 4.1 and 5.5, respectively, and the corresponding creep mechanism is dislocation slip and climbing.

Key words: magnesium alloys; T6 heat treatment; creep properties

随着钢铁、铜、铝等金属矿产资源的日益消耗,以及全球变暖、温室效应等环境问题的不断加剧,开发和应用新型轻质材料来实现结构件减重和提高燃料利用率已成为当前经济可持续发展的重要课题。近年来,由于镁合金的比强度高和优异的阻尼性

能,在汽车、航空航天、电子产品等领域得到广泛应用^[1-2]。铸造镁合金,特别是 Mg-Al 系铸造镁合金因优良的铸造性能和耐腐蚀性能已在多个行业得到大量使用,但较低的力学性能阻碍其进一步发展。同时变形镁合金由于更好的力学性能受到人们的广泛关注。AZ80 镁合金是最常用的变形镁合金之一,在高温下具有稳定的成形能力和力学性能。

在材料各种力学性能指标中,当合金在高温下服役较长时间时,蠕变性能是评估材料稳定性的重要指标。近 30 年来,已有的研究工作^[3-4]主要集中在铸造镁合金的蠕变性能方面,而最近更多人热衷于研究变形镁合金的蠕变性能。He 等^[5]研究了挤压态 Mg-Gd-Y-Zr 合金的拉伸蠕变性能。Yuan 等^[6]研

收稿日期:2019-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574291)

作者简介:张冬冬(1993-),男,山西长治人,硕士生,主要研究方向:镁合金环轧件的热处理;电话:18874751210;

E-mail:2453429589@qq.com

通讯作者:万迎春(1988-),女,河北衡水人,博士后,研究方向:变形镁合金大构件制备及其关键技术;

E-mail:ycwanmse@126.com

究了 T5 热处理对挤压态 Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金蠕变行为的影响,但很少人研究 Mg-Al 系变形镁合金的蠕变性能。适量的 Ag 元素能有效地提高镁合金的力学性能和耐热性能。Yu 等^[7]研究发现,Ag 元素提高了 AZ80 镁合金的峰时效硬度并缩短到达峰时效的时间。Zeng 等^[8]进一步研究了时效制度对 AZ80-Ag 镁合金环轧件力学性能的影响。考虑到实际生产中的应用,本文试验材料选择 AZ80-Ag 镁合金(在 AZ80 镁合金中添加 0.20wt% Ag)。同时,因为 T6 热处理通过重新优化合金中第二相的大小和分布能够显著改善合金的力学性能,因此,本文重点研究了 T6 热处理对 AZ80-Ag 镁合金拉伸和蠕变性能的影响,并探索第二相对合金蠕变行为的作用机理。

1 试验材料与方法

本文所使用的材料为 AZ80-Ag 镁合金环轧件,其名义成分为 Mg-8.1Al-0.46Zn-0.18Mn-0.18wt% Ag。所有试验样品均采用电火花线切割在环轧件中部取样,取样位置如图 1 所示。T6 热处理制度为:在温度为 410℃ 的固熔炉中固溶处理 2h 并在水中淬火,然后在 175℃ 的时效炉中时效 36h 后取出空冷。

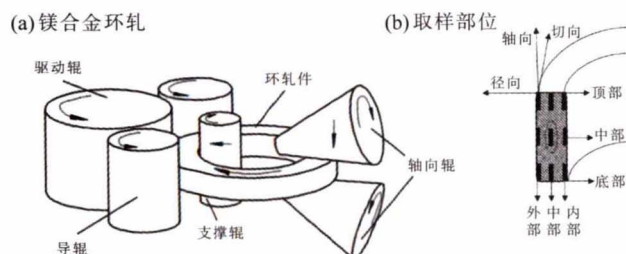


图 1 AZ80-Ag 镁合金环轧示意图及取样位置
Fig.1 Schematic diagram of ring rolling of AZ80-Ag magnesium alloy and sampling position

采用 Leica 金相显微镜和 Nova Nano230 扫描电子显微镜观察合金不同状态下的物相形貌。金相和扫描样品使用金相砂纸打磨,然后用成分为 1g 草酸+1 mL 硝酸+1 mL 醋酸+150 mL 水的腐蚀液电解抛光。室温拉伸和高温拉伸试验均在 Instron 3369 万能拉伸试验机进行,拉伸速度为 1 mm/min。为保证试验结果可靠性,同一状态的拉伸试验需要重复 3 次。蠕变试验在 RWS 50 蠕变机进行,蠕变温度为 150℃,蠕变应力分别为 70、80 和 90 MPa。拉伸试样和蠕变试样分别按照 GB/T 228-2002 和 GB/T 2039-1997 取样。

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织及拉伸性能

在 Mg-Al 系镁合金中, β -Mg₁₇Al₁₂ 相是主要的强化相,根据其形貌可以分为连续和不连续两种类型。连续析出相包括板条状析出相和菱形析出相,而不连续析出相包括胞状、椭球状和晶间析出相 3 种^[9]。图 2 是 AZ80-Ag 镁合金环轧件变形态和 T6 态的显微组织。由图 2(a)可看出,变形态合金的显微组织主要由动态再结晶晶粒组成,而且在晶界上分布着大小不一的第二相,这些析出相被认为是应变诱导析出的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相^[7-8]。图 2(b)是经 T6 处理后合金的显微组织。可以发现,在晶界上分布有大量不连续析出相,而晶粒内部有许多连续析出相。这是因为在变形态合金中原先存在的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相在固溶处理过程中高温扩散溶入基体形成过饱和固溶体,并在后续时效处理过程中发生分解,析出呈薄片状的弥散 β -Mg₁₇Al₁₂ 相,与基体非共格,其惯析面平行于基面^[9]。从图 2(c)、(d)可以看出, β -Mg₁₇Al₁₂ 相可以在晶粒内连续析出,也可以在晶界上不连续析出,从而形成球状或网络状组织。通常连续析出和不连续析出同时存在,时效初期以非连续析出为主,然后再发生连续析出。但连续析出对 Al 含量敏感,并能够在未被不连续析出相占据的镁基体中直接形核,因此,固溶处理有利于后续时效过程中连续析出相的形成。

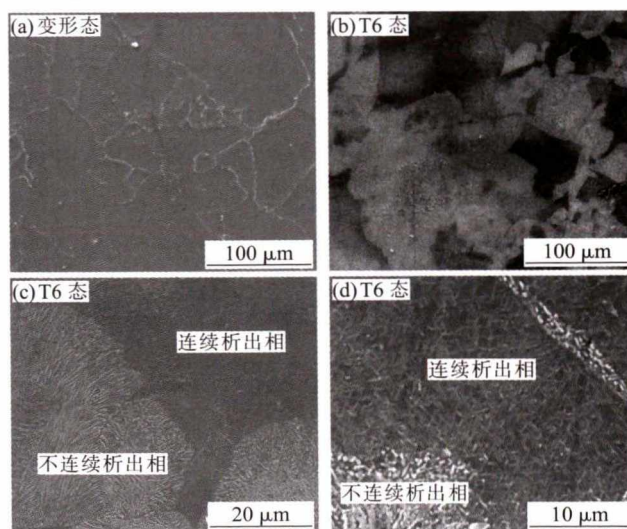


图 2 AZ80-Ag 镁合金环轧件的变形态和 T6 态的显微组织

Fig.2 Microstructure of AZ80-Ag magnesium alloy ring rolling piece in deformed and T6 states

在室温下不同热处理状态试样的工程应力-工程应变拉伸曲线如图3所示。从拉伸曲线可看出经T6处理后,合金的室温屈服强度和抗拉强度分别为223 MPa和350 MPa,较变形态的强度均有明显提高。这是因为,经T6热处理后,析出的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相在室温下对位错滑移有强烈的阻碍作用,造成时效硬化。

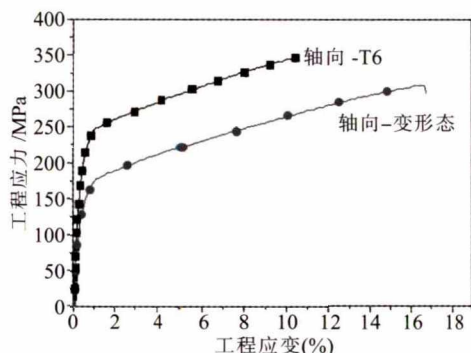


图3 不同热处理状态试样的工程应力-工程应变拉伸曲线
Fig.3 Engineering stress-strain tensile curves of samples under different heat treatment conditions

2.2 合金的蠕变性能及蠕变机制分析

一般蠕变过程包括两个对立的方面:软化机制(比如孔洞、交滑移等)和强化机制(固溶强化和析出强化)。在蠕变过程中,强化形式从固溶强化变为析出强化,最终达到过时效,稳态蠕变速率出现在硬化和软化机制的平衡点。当强化机制占主导地位时,蠕变速度降低;当软化机制占上风时,蠕变速度升高。由于合金组织的不稳定性会影响蠕变行为,因此,可以从组织的稳定性解释蠕变行为,从而与强化机制联系起来。150℃下变形态和T6态合金蠕变100h的蠕变曲线如图4所示。相应的蠕变速率-时间曲线如图5所示。

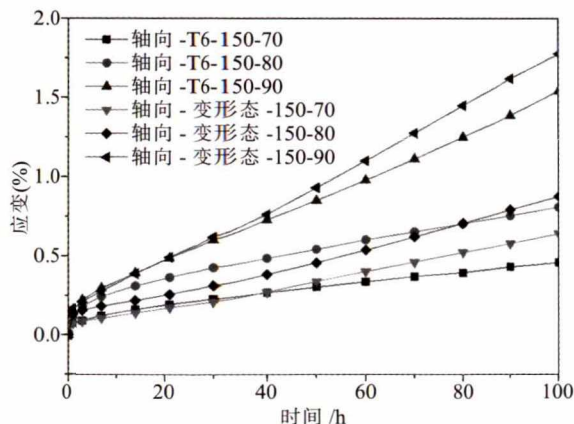


图4 150℃下变形态和T6态合金蠕变100h的蠕变曲线
Fig.4 Creep curves of the alloy in deformed state and T6 state creep deforming at 150℃ for 100 h

从图4和图5中可看出,合金在蠕变过程中存在减速、稳态、加速3个蠕变阶段^[10]。一般初始减速蠕变阶段是因为位错塞积导致加工硬化。但蠕变初期的位错运动引起 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相在位错密度高的区域形核,一段时间后 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相在合金各处显微组织中析出, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相优先在基面析出,从而阻碍位错同时促进位错的交滑移,开始进行速度较快,然后慢慢趋于稳定。

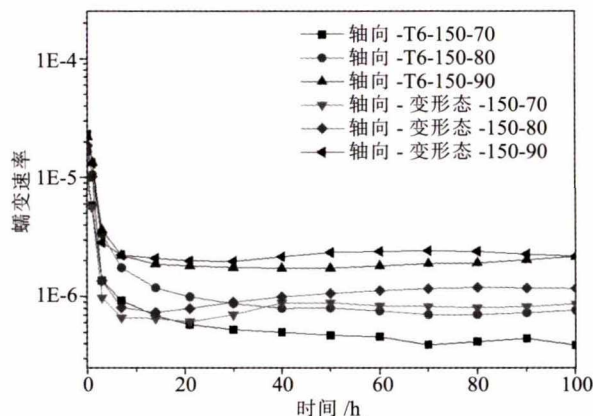


图5 150℃下变形态和T6态合金蠕变100h的蠕变速率-时间曲线
Fig.5 Creep rate-time curves of and T6 states the alloy in deformed deforming at 150℃ for 100 h

在Mg-Al系合金中,稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}$ 、应力指数 n 和蠕变激活能 Q 之间的关系可以用式(1)表示^[8]:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

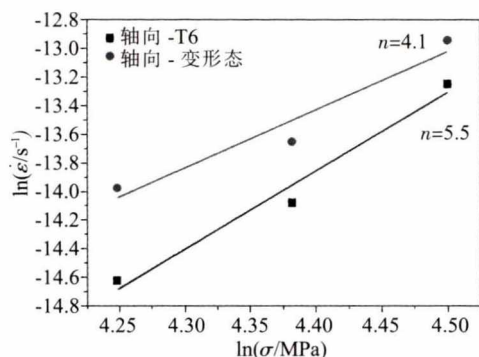
式中: A 表示材料相关系数; R 为气体常量,8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹;蠕变应力指数 n 是判别蠕变机制的重要参数之一。根据式(1)可以得到:

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

因此,给定温度下,本文的试验温度为150℃,应力指数 n 可以表示为:

$$n = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right|_T \quad (3)$$

为判断150℃变形态和T6态镁合金的蠕变机制,绘制的样品变形态和T6态的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 曲线如图6所示。两者的蠕变应力指数 n 分别为4.1和5.5。查阅相关文献[11-12]发现:当 $n \approx 1$ 时,扩散蠕变是主要的蠕变机制;当 $n \approx 3 \sim 7$ 时,主要蠕变机制是位错蠕变;当 $n > 7$ 时,幂律机制为主要蠕变机制。所以,在150℃的蠕变温度、70~90 MPa的应力条件下,AZ80-Ag镁合金环轧件的蠕变机制为位错蠕变,包括位错滑移和攀移。

图6 样品变态和T6态的 $\ln\dot{\epsilon}$ - $\ln\sigma$ 曲线Fig.6 $\ln\dot{\epsilon}$ - $\ln\sigma$ curves of samples in deformed and T6 states

3 结论

(1) AZ80-Ag 镁合金经热环轧后的显微组织主要由动态再结晶晶粒组成,晶界上分布有少量析出相;经T6热处理后在晶界和晶粒内部析出大量 β -Mg₁₇Al₁₂相。

(2) 经T6热处理后,AZ80-Ag 镁合金环轧件在室温下的屈服强度和抗拉强度显著提高,分别达到223、350 MPa。

(3) AZ80-Ag 镁合金变态和T6态的蠕变应力指数 n 分别为4.1和5.5,其蠕变机制为位错滑移和攀移控制的蠕变。

参考文献:

- [1] Jean D M D, Hirotohi M M D, Matsumoto K I, et al. New perspectives in magnesium research [M]. London:Springer, 2007.
- [2] 张文玉,刘先兰. 异步轧制技术及其在镁合金中的应用[J]. 锻

压技术,2008,33(2):1-5.

- [3] Regev M, Rosen A, Bamberger M. Qualitative model for creep of AZ91D magnesium alloy[J]. Metallurgical & Materials Transactions A,2001,32(6):1335-1345.
- [4] Suman C. Creep of diecast magnesium alloys AZ91D and AM60B[M]. London:Casting,1991.
- [5] He S M, Zeng X Q, Peng L M, et al. Microstructure, mechanical properties, creep and corrosion resistance of Mg-Gd-Y-Zr (-Ca) alloys [J]. Progress in Light Metals Aerospace Materials & Superconductors,2007,546:101-104.
- [9] Yuan L, Shi W, Jiang W M, et al. Effect of heat treatment on elevated temperature tensile and creep properties of the extruded Mg-6Gd-4Y-Nd-0.7Zr alloy [J]. Materials Science & Engineering A,2016,658:339-347.
- [7] Yu S L, Gao Y H, Liu C M, et al. Effect of aging temperature on precipitation behavior and mechanical properties of extruded AZ80-Ag alloy [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015,646:431-436.
- [8] Zeng G, Yu S L, Gao Y H, et al. Effects of hot ring rolling and aging treatment on microstructure and mechanical properties of AZ80-Ag alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2015,645:273-279.
- [9] Lai W J, Li Y Y, Hsu Y F, et al. Aging behaviour and precipitate morphologies in Mg-7.7Al-0.5Zn-0.3Mn (wt%) alloy [J]. Journal of Alloys & compounds,2009,476(1):118-124.
- [10] Luo A, Pekguleryuz M O. Cast magnesium alloys for elevated temperature applications [J]. Journal of Materials Science, 1994,29(20):5259-5271.
- [11] Regev M, Aghion E, Rosen A, et al. Creep studies of coarse-grained AZ91D magnesium castings [J]. Materials Science & Engineering A,1998,252(1):6-16.
- [12] Wang H, Wang Q D, Boehlert C J, et al. Tensile and compressive creep behavior of extruded Mg-10Gd-3Y-0.5Zr (wt%) alloy[J]. Materials Characterization,2015,99:25-37. 

倡导原创 拒绝抄袭

凡作者投向本刊的稿件,请务必做到原创。本刊不接收非原创稿件。本刊对每篇作者来稿,只要初步认可,都要进行查重处理。对于查重不过关的稿件,一律退稿。

由于查重软件的局限性,个别严重抄袭的稿件没有被查出,被本刊录用。这样的稿件一经发表,往往被原作者举报。凡被原作者举报的稿件,一经查实,本刊会立即通知有关网络机构将这类稿件从网络版上撤除。

这类稿件严重危害了本刊声誉。对于这类稿件,本刊绝不姑息,坚决配合有关网络机构将其从网络版上取缔。

近年来,本刊每年都有极个别已发表稿件被原作者举报。经查实后,有关网络机构都对其做了撤稿处理。请个别作者不要抱侥幸心理,自欺欺人。

本刊大力呼吁作者:诚信做人,坚持原创,绝不抄袭。