# AZ31B 镁合金大应变循环变形行为研究

耿长建,师俊东,李晓欣,王志宏,滕佰秋 (中航工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:为了研究 AZ31B 镁合金在大应变幅条件下的变形机制,开展了该合金在 7.5%应变幅条件下的循环行为研究。结果表明: 在拉伸阶段的最大应力值随着循环周次的增加而减小,而在压缩过程中的最大应力值随着循环周次的增加而增大,在整个循环过 程中材料呈现循环应变硬化特性,拉应力是导致循环应变硬化的主要原因;随着循环周次增加,滞回曲线的不对称性基本不变。真 应力 - 真应变滞回曲线在卸载和反向拉伸阶段出现 3 个拐点。在压缩过程中发生{10-12}孪生,反向拉伸过程发生去孪生行为,包 申格效应对去孪生行为具有较大影响。研究表明:孪生 - 去孪生是大应变幅循环变形的主要变形机制;对拉伸、反向压缩过程的变 形特征及机制的分析,可为低周疲劳行为的研究提供参考。

关键词:AZ31B 镁合金;非对称;应变硬化;滞回曲线;孪生 - 去孪生
中图分类号:V216.3
文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.01.016

#### Cyclic Deformation Behavior of AZ31B Magnesium Alloy at Large Amplitude

GENG Chang-jian, SHI Jun-dong, LI Xiao-xin, WANG Zhi-hong, TENG Bai-qiu

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to research the deformation mechanism of material under large amplitude conditions, the cyclic deformation behavior of an extruded AZ31B magnesium alloy with the fiber texture components was investigated under tensile-tensile asymmetric strain loading at 7.5% amplitude. It was found that the maximum tensile stress decreased with the increase of cyclic number, while the maximum compressive stress increased, the alloy presented cyclic strain -hardening characteristics in the whole cycle. The cyclic hardening was resulted from tensile deformation; the asymmetry of the hysteresis loop basically unchanged during the whole cyclic. Three turning points appeared during unloading and reversal tension process on the true stress-true strain curves. {10-12} tension twinning was activated in compressive process and its detwinning happened in reversal tension process, Bauschinger effect has a greater impact on the detwinning. It was found from deformed microstructures that twinning -detwinning is dominant plastic deformation at the high amplitude.Through the analysis of the deformation characteristics and mechanism of stress and reversal tension process, it can provide reference for the research of low cycle fatigue behaviors.

Key words: AZ31B magnesium alloy; asymmetric; cyclic hardening; hysteresis loop; twinning-detwinning

# 0 引言

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、铸造性 能良好、电磁屏蔽能力较强以及易于再生利用等一系 列优点,被誉为"21世纪最具发展潜力和前途的材 料"。其结构件在汽车、飞机、计算机、通讯等领域的应 用日益广泛<sup>[1-3]</sup>。AZ31B变形镁合金因其延展率良好 和强度较高,是目前应用最多的挤压变形镁合金。在 不同加载方向下,AZ31B 变形镁合金呈现各向异性。 许多对镁合金在应变控制的低周疲劳的研究表明,加 载方式和样品的织构对其疲劳性能具有重要影响<sup>[4-10]</sup>。 研究表明,在镁合金低周疲劳过程中每周期都发生的 孪生-去孪生行为对其疲劳起重要作用<sup>[11-14]</sup>。在以往 研究中,大都加载对称性应变幅进行疲劳试验。在同 一应变幅下,由对称性应变幅和非对称性应变幅控制 的疲劳中产生的初始孪生种类、数量及产生机制大不

**收稿日期:**2015-03-30 基金项目:国家自然科学基金(51171120,90202001)资助 作者简介:耿长建(1980),男,博士,从事金属材料性能及其微观变形机制研究工作;E-mail:gengchangjian2008@163.com。

相同。

为了更清楚地了解不同加载方式下的低周疲劳 过程中塑性变形机制与疲劳行为之间的关系。本文研 究了大应变幅条件下 AZ31B 镁合金的疲劳行为,对 镁合金材料设计和应用具有重要意义。

## 1 试验材料和方法

试验采用的 AZ31B 镁合金属于 Mg-Al-Zn 系合 金,是目前工业界使用较广泛的 1 种变形镁合金。合 金中加入的 Al 元素可与 Mg 形成固溶体,提高了合 金的力学性能;同时 Al 元素还可提高合金的耐腐蚀 性,减小凝固时的收缩,改善合金的锻造性能,增强铸 件强度。Zn 是另 1 种有效的合金化元素,在镁合金内 以固溶体形式存在,对合金性能的影响与 Al 相似,但 Zn 的质量分数高于 2%时会导致热裂现象,因而应严 格控制。加入 Mn 元素可提高镁合金的韧性,还能改 善其耐腐蚀性能。铁、铜、镍等杂质元素会降低合金的 耐腐蚀性能,应严格控制其含量。综上可知,该合金成 本较低。AZ31B 镁合金的名义成分见表 1。

表1 AZ31B	镁合金名义化学成分
----------	-----------

Element	AI	Zn	Si	Cu	Mn
wt%	2.7	0.96	0.01	≤0.01	0.21
Element	Fe	Ni	Са	Sn	Mg
wt%	0.002	≤0.001	≤0.01	0.00	Bal

将合金棒材加工成标距长度 30 mm、标距直径 6 mm、总长度 90 mm 的轴向光滑疲劳试样。EBSD 样品 的电解抛光液为 10% HCIO4+90%乙醇,电压为 30~40V,电流为 1~2 mA,电解抛光的温度为 243 K。使用液氮作为制冷剂。抛光后,在酒精中反复冲洗以 洗掉样品表面残留抛光液,吹干即可。在应变控制的 低周试验中,三角波能保持应变速率在整个循环拉压 过程中的状态保持不变;采用轴向加载方式在 MTS 试验机上进行试验。

## 2 试验结果

原始挤压 AZ31B 镁 合金退火后显微组织如图 1 所示。从图中可见,样品 晶粒为等轴组织,尺寸不 均匀,平均尺寸为 15 μm 左右。



样品反极如图 2 所示。从图中可见,织构主要 由强的 <10-10> 丝织构 组分和较弱的 <11-20> 丝织构组分构成,{0002}晶 面平行于挤压方向(ED)。

应力幅(Δσ/2)随循 环周次变化曲线如图 3 所示。从图中可见,在循 环变形的前5周期,应力 幅值随循环周次的增加





迅速增大,即合金产生了明显硬化。随着变形的发展, 应力幅值的增大变得缓慢,直至样品断裂。由于循环变 形时应变幅为7.5%,(采用如此大的应变幅是因为在 大应变幅下镁合金的孪晶-去孪晶行为更加明显)如 此大的应变量在循环变形中累积大量的塑性变形,造 成材料损伤,因此至断裂时的循环周次较小,仅为68。

在循环变形过程中拉伸和压缩时的最大应力随 循环周次的变化如图 4 所示,表明了循环过程中应力 幅的变化。从图 4(a)中可见,在拉伸过程中最大应力 值随着循环周期的增加而减小,特别是在初始阶段, 其减小速度较快。在压缩过程中最大应力绝对值随着 循环周期的增加而增大,而在初始阶段,增加速度较 快(如图 4(b)所示)。由于在压缩过程中应力增大速 度大于拉伸过程中的应力减小速度,故图 3 中应力幅 随循环周次增加而增大,从而出现循环硬化现象。由 此可以推断,循环应变硬化是因压缩变形过程中的形 变强化所致。



图 4 最大应力 - 循环周次曲线

不同循环周期的真应力 - 真应变滞回曲线如图 5 所示。从图中可见,在循环过程中滞回曲线呈非对 称性。初始拉伸过程曲线与一般拉伸曲线基本一致, 呈下凹状,随着循环变形的发展,其它循环周次拉伸 过程曲线形状基本与初始拉伸过程曲线一致。而在初 始卸载和反向压缩过程 中,曲线开始出现3个 拐点(图中A、B、C所 示)。随着循环周次增 加,滞回曲线非对称性 无明显变化。



#### 3 分析讨论

### 3.1 循环变形组织

拉-拉大应变幅前2周期的金相组织如图6所示。在初次拉伸过程中,变形组织中出现孪晶(图6(a)),说明孪生机制在此变形过程中起重要作用。在卸载和反向压缩过程中,出现大量孪晶(图6(b)),而在随后的第2次拉伸过程中,大量孪晶消失(图6(c)),在第2次卸载和反向压缩中,又有大量孪晶产 生(图6(d))。



#### 3.2 循环变形过程中的孪生 - 去孪生机制

从前2周期的真应力-真应变滞回曲线(图5) 中可见,在大应变幅下,在前2周期内循环变形滞回 曲线已呈现不对称性,说明拉伸与压缩阶段的塑性变 形机制有所不同,拉伸与压缩变形组织中孪晶数量的 变化反映了这种差异。

初次拉伸、初次卸载压缩、第2次拉伸和第2次 卸载压缩的变形组织的 EBSD 取向及其所对应的差 取向分布如图7所示。从图7(a)中可见,在初次拉伸 过程中产生的少量孪晶主要为{10-12}拉伸孪晶(蓝 线所示),其余为 {10-11} 压缩孪晶(黄线所示)和 {10-12}-{10-11}双孪晶(红线所示);在接下来的初次 卸载和压缩过程中出现的大量孪晶几乎全部为 {10-12}拉伸孪晶(图7(b)),且有些孪晶穿过晶界,贯 穿几个晶粒,说明在卸载和反向压缩过程中具有很强 的孪生倾向。在第2次拉伸过程中,{10-12}拉伸孪生 的数量急剧减少(图7(c)),说明在该拉伸过程中发 生了去孪生行为,然后在第2次卸载和反向压缩过程 中又产生了大量拉伸孪生(图7(d))。





在循环变形过程中,孪晶的变化导致晶体取向分 布的变化。初次拉伸、初次卸载压缩、第2次拉伸和第 2次卸载压缩的变形组织的极图如图8所示,其中Z0 对应ED,X0、Y0对应径向。从图8(a)中可见,经过初 次拉伸后,变形组织的晶体取向分布无大的变化,为 {0001}//ED。经卸载与反向压缩后,部分取向旋转至 c-轴平行于拉伸轴位置(图 8(b)),其原因是由于产 生大量的 {10-12} 拉伸孪生(晶粒与基体间的 <11-20>86°取向)所致。在第 2次拉伸变形后,由于去 孪晶的作用,取向回复到初始位置(图 8(c)),由于测 试时样品放置有些倾斜,因此与原始位置相比,取向 有些偏斜)。在第 2次压缩变形后,由于又产生大量拉 伸孪晶,取向变化与第 1次的压缩相似,孪晶晶粒的 取向集中在 c-轴与拉伸轴平行的位置(图 8(d))。由 上述过程可知,在大应变幅的循环变形中,{10-12}孪 生-去孪生机制起重要作用。



#### 3.3 滞回曲线

一般来说,材料在非对称应变循环变形条件下的 应力变化与对称应变循环变形条件下的应力变化有 差异。材料在拉 - 拉循环变形条件下(Ra=0)的应力 随应变变化如图 9 所示。从图中可见,在小应变幅下 的拉伸开始阶段,首先发生弹性形变,然后是弹塑性 变形至 a 点。卸载后,发生回弹,应力降为零,但残留 有小的塑性应变。此时,若将应变回复到零,需要有压 缩应力形成反向加载,所需压缩应力的大小取决去残 留塑性应变的大小和反向压缩过程中材料的屈服应 力大小。由于在小应变幅下发生的塑性应变极小,所 以从 a 到 b 的应力 - 应变曲线为线性,该过程为弹性 应变。在接下来的循环变形过程中,应力 - 应变响应 将沿着图中所示的红色直线在 a、b 之间往复进行。然 而在大应变幅下的循环变形过程中,在拉伸初始阶段 发生弹性应变后,从 a 到 c 发生较大的弹塑性应变。 卸载后,发生回弹,应力降为零,但残留的塑性应变比 较大,若将应变回复至零,需要较大的压缩应力。但在 该过程中有可能发生塑性屈服,屈服应力的大小取决 于塑性变形的大小和是否发生包申格效应<sup>[15-17]</sup>。在理 想情况下,从 c 到 d 发生弹性应变,在 d 点发生屈服,

而从 d 到 e 为弹塑性应 变。在接下来的卸载和反 向拉伸过程中,应力 - 应 变曲线从 e 到 f 为线性, 为弹性过程,而从 f 到 c 为非线性,为弹塑性过 程,由 f 到 c,构成 c-d-e-f-c 滞回曲线。



## 4 结论

(1)在拉-拉大应变幅循环变形过程中,在拉伸 过程中的最大应力值随着循环周次的增加而减小。

(2)拉-拉大应变幅下真应力-真应变滞回曲 线在卸载和反向拉伸阶段出现3个拐点。

(3)在大应变幅下,在前2周期内循环变形滞回 曲线已经呈现不对称性,说明拉伸与压缩阶段的塑性 变形机制有所不同,在压缩过程中产生孪生行为,在 拉伸过程中产生去孪生行为。

#### 参考文献:

- [1] Bamett M R, Keshavar Z Z, Beer A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3AI-1Zn [J]. Acta Materialia, 2004, 52(17): 5093-5103.
- [2] Kim W J, Hong S I, Kim Y S. Texture development and it effect on mechanical properties of all AZ61 Mg alloy fabricated by equal channel angular pressing [J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3293-3307.
- [3] Agnew S R, Mehrotra P, Lillo T M, et al. Crystallographic texture evolution of three wrought magnesium alloys during equal channel angular extrusion [J]. Material Science and Engineering, 2005, 408 (1-2): 72-78.
- [4] Begum S, Chen D L, Xu S, et al. Effect of strain ratio and strain rate on low cycle fatigue behavior of AZ31 wrought magnesium alloy[J]. Materials

Science and Engineering A, 2009, 517(1-2): 334-343.

- [5] LI Q Z,YU Q,ZHANG J X,et al. Effect of strain amplitude on tension-compression fatigue behavior of extruded Mg6Al1ZnA magnesium alloy[J]. Scripta Materialia,2010,62(10):778-781.
- [6] Patel H A, Chen D L, Bhole S D, et al. Cyclic deformation and twinning in a semi-solid processed AZ91D magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering A. 2010, 528(1): 208-219.
- [7] ZHANG J X, YU Q, JIANG Y Y, et al. An experimental study of cyclic deformation of extruded AZ61A magnesium alloy [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(5): 768-787.
- [8] LYU F, YANG F, LI S X, et al. Effects of hysteresis energy and mean stress on low-cycle fatigue behaviors of an extruded magnesium alloy [J]. Scripta Materialia, 2011, 65(1):53-56.
- [9] LYU F, YANG F, Duan Q Q, et al. Fatigue properties of rolled magnesium alloy (AZ31) sheet: influence of specimen orientation [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(5):672-682.
- [10] YU Q, ZHANG J X, JIANG Y Y, et al. Multi-axial fatigue of extruded AZ61A magnesium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33 (3):437-447.
- [11] WU L, JAIN A, Brown D W, et al. Twinning-detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought

magnesium alloy, ZK60A[J]. Acta Materialia, 2008, 56(4): 688-695.

- [12] Proust G, Tom é C N, Jain A, et al. Modeling the effect of twinning and detwinning during strain-path changes of magnesium alloy AZ31
  [J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25(5):861-880.
- [13] Park S H, Hong S G, Lee C S. Role of initial {10-12} twin in the fatigue behavior of rolled Mg-3AI-1Zn alloy [J]. Scripta Materialia, 2010,62(1):666-669.
- [14] WU L,Agnew S R,REN Y, et al. The effects of texture and extension twinning on the low-cycle fatigue behavior of a rolled magnesium alloy, AZ31B[J]. Materials Science and Engineering A,2010,527 (26): 7057-7067.
- [15] White L W, Strader J T, Austin R J, et al. An elasticity measurement in the Mg-Cd alloy system [J]. Acta Metallurgica, 1967, 15 (1): 45-47.
- [16] Buciumeanu M, Palaghian L, Miranda A S, et al. Fatigue life predictions including the Bauschinger effect[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33 (2):145-152.
- [17] Park S H, HONG S G, Lee B H, et al. Low-cycle fatigue characteristics of rolled Mg-3AI-1Zn alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2010,32(11):1835-1842.

(编辑:赵明菁)