

## 单轴应力循环作用下 AZ91D 镁合金的棘轮行为

罗秀芳, 杨婷慧, 李 政, 张新平, 王 阳, 董 成, 黄杨佳, 张念苏

(南京理工大学 材料科学与工程系, 南京 210094)

**摘 要:**对 AZ91D 镁合金进行了室温单轴应力控制下的循环实验, 研究幅值应力  $\sigma_p$ 、平均应力  $\sigma_m$  及峰值应力  $\sigma_a$ 、应力比及加载历史对 AZ91D 镁合金棘轮行为的影响。结果表明: 棘轮应变率随  $\sigma_a$  和  $\sigma_m$  的提高而增大;  $\sigma_p$  和应力比对棘轮行为产生很大的影响; 先前高平均应力、幅值应力水平的循环历史很大程度上抑制后续低应力水平时的棘轮行为; 先前低应力水平对后续的棘轮行为也会产生影响; AZ91D 镁合金的  $\varepsilon_r$  与  $\sigma_p$  并不一一对应, 给出了  $\varepsilon_r$  与  $\sigma_m$  和  $\sigma_a$  的关系式。

**关键词:** AZ91D 镁合金; 棘轮行为; 应力控制; 单轴加载; 本构模型

中图分类号: TG 113.25 文献标识码: A

## Ratcheting behavior of AZ91D magnesium alloy under uniaxial cyclic stressing

LUO Xiu-fang, YANG Ting-hui, LI Zheng, ZHANG Xin-ping,

WANG Yang, DONG Cheng, HUANG Yang-jia, ZHANG Nian-su

(Department of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A number of uniaxial stress-controlled cycle loading experiments were conducted for AZ91D magnesium alloy at room temperature. The effects of the stress amplitude, mean stress, peak stress, stress ratio and loading history on the ratcheting behavior of AZ91D magnesium alloy were investigated. The results show that the ratcheting strain rate increases with increasing peak stress and mean stress. A prior cycling with higher mean stress or stress amplitude greatly decreases the ratcheting rate of the subsequent cycling with lower mean stress or stress amplitude. And prior cycling with lower stress has effect on the ratcheting behavior of the subsequent cycling with higher stress level. The correspondence between  $\varepsilon_r$  and  $\sigma_p$  is not one-to-one, the relationships among  $\varepsilon_r$ ,  $\sigma_m$  and  $\sigma_a$  were obtained.

**Key words:** AZ91D magnesium alloy; ratcheting behavior; stress control; uniaxial loading; constitutive model

近年来, 镁合金在许多工业领域中的应用呈现良好的发展前景, 特别是在运输行业, 采用镁合金是运输工具轻量化的有效途径。由于 AZ91 系列镁合金具有较高的室温强度、优良的铸造工艺性能、良好的耐腐蚀性以及较低的成本等优点, 已经成为目前使用最广泛的一种镁合金。用于制作如镁合金汽车轮毂、镁合金方向盘转轴和登山车车圈等构件。这些构件都在变

幅载荷、非对称应力或应变循环条件服役, 会产生塑性应变累积, 即产生棘轮行为<sup>[1-3]</sup>。当棘轮变形达到等量循环增加或加速增长的畸变状态时, 以及当棘轮变形达到循环饱和状态时, 塑性累积将导致构件尺寸超标或循环破坏失效。所以, 在此类结构构件的可靠性设计和寿命评估中必须考虑棘轮行为的影响<sup>[4-6]</sup>。

对于 Sn-Pb 钎料<sup>[7]</sup>、T225NG 合金<sup>[8]</sup>、纯铝、SiC<sub>p</sub>/Al

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50801038); 南京理工大学“紫金之星”计划

收稿日期: 2008-10-16; 修订日期: 2009-05-12

通讯作者: 张新平, 副教授, 博士; 电话: 025-84303983; E-mail: xpzhang@mail.njust.edu.cn

复合材料<sup>[9]</sup>、不锈钢<sup>[10]</sup>、紫铜<sup>[11]</sup>和 Ti 合金<sup>[12]</sup>等材料的宏观棘轮行为研究方面, 国内外学者已经取得了大量的研究成果, 但其研究成果不能直接用于镁合金。作为一种新型结构材料, 镁合金存在拉压不对称特性<sup>[13]</sup>, 即拉伸强度明显高于压缩强度, 有别于其它材料拉伸强度低于压缩强度的现象, 研究表明该特性损害循环载荷下镁合金的疲劳寿命, 同样可以推断这种特性也可能对棘轮行为特性产生较大影响。目前, 关于 AZ91D 镁合金棘轮行为方面的研究很少, 因此, 本文作者对 AZ91D 镁合金进行室温单轴应力控制下的循环实验, 并建立宏观本构模型, 为非对称循环服役条件下镁合金构件寿命的预测提供数据, 是镁合金应用可靠性评估的基础性工作。

## 1 实验

### 1.1 试验设备与试样

实验用设备为英国 Instron8801 电液伺服疲劳试验机, 使用 Fast Track console 和 Smax 控制软件对整个实验过程进行闭环控制和数据采集。

试样采用 AZ91D 镁合金(抗拉强度  $\sigma_b=211.7$  MPa, 屈服强度  $\sigma_{0.2}=133.4$  MPa)。试样线切割加工后使用金相砂纸逐级打磨, 并使用 W1# 钻石研磨膏进行研磨抛光, 使试样标量部分表面基本达到镜面。

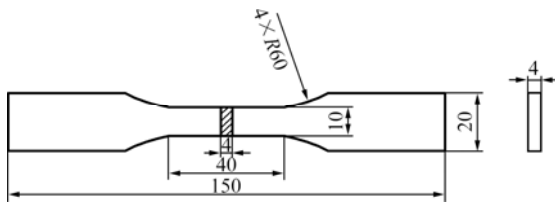


图 1 AZ91D 镁合金试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of AZ91D sample(Unit: mm)

### 1.2 棘轮试验方法

在实验加载过程中, 按时间同步采集位移和轴向载荷等实验数据。采用正弦波加载, 加载频率 1 Hz。试验参数如下:

- (1)  $\sigma_m=40$  MPa,  $\sigma_a=110$  120 130 140 MPa;
- (2)  $\sigma_m=70$  MPa,  $\sigma_a=70$  80 100 110 80 MPa;
- (3)  $\sigma_m=90$  MPa,  $\sigma_a=50$  60 70 80 90 60 MPa;
- (4)  $\sigma_m=110$  MPa,  $\sigma_a=30$  40 50 60 70 40 MPa;
- (5)  $\sigma_a=70$  MPa,  $\sigma_m=70$  80 90 110 120 80 MPa;
- (6)  $\sigma_a=80$  MPa,  $\sigma_m=60$  70 100 110 70 MPa;
- (7)  $\sigma_a=90$  MPa,  $\sigma_m=50$  60 70 100 60 MPa;

- (8)  $\sigma_p=130$  MPa,  $R=-0.15$  0 0.15 0.3 0.45 MPa;
- (9)  $\sigma_p=150$  MPa,  $R=-0.2$  0 0.2 0.4 0.6 MPa;
- (10)  $\sigma_p=170$  MPa,  $R=-0.2$  0 0.2 0.4 0.6 MPa;
- (11)  $\sigma_p=190$  MPa,  $R=-0.2$  0 0.2 0.4 0.6 MPa。

其中:  $\sigma_a$  为幅值应力, MPa;  $\sigma_m$  是平均应力, MPa; 应力比  $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=(\sigma_m+\sigma_a)/(\sigma_m-\sigma_a)$  是最小值和最大值的比;  $\sigma_p$  是峰值应力, 即  $\sigma_p=\sigma_m+\sigma_a$ , MPa。

(1)~(4) 组试验参数主要考察幅值应力  $\sigma_a$  对宏观棘轮实验的影响;(5)~(7) 组试验参数主要考察平均应力  $\sigma_m$  对棘轮试验的影响;(8)~(11) 组试验参数考察应力比  $R$  和峰值应力  $\sigma_p$  对棘轮行为的影响。

棘轮应变  $\varepsilon_r$  的定义如下<sup>[1]</sup>:

$$\varepsilon_r=(\varepsilon_{\max}+\varepsilon_{\min})/2$$

式中:  $\varepsilon_{\max}$  为一个循环中的最大名义应变值;  $\varepsilon_{\min}$  为一个循环中的最小名义应变值。

棘轮应变率的定义如下:  $\dot{\varepsilon}_r=d\varepsilon_r/dN$ , 即每一循环中棘轮应变  $\varepsilon_r$  的增量,  $N$  为循环周次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应力幅值对棘轮行为的影响

幅值应力控制条件下 AZ91D 镁合金的应力—应变曲线和棘轮应变—循环周次曲线如图 2 所示。从图 2(a)中所示的滞后回线沿应变增大方向的“循环蠕动”和图 2(b)中曲线阶梯状上升都可看出 AZ91D 镁合金棘轮行为的发生。每一工况循环中, AZ91D 镁合金都经历了棘轮应变率  $d\varepsilon_r/dN$  从较大值逐渐减小的棘轮安定过程, 也就意味着产生的累积塑性应变和正反向加载部分的塑性模量差均下降。这体现了循环硬化材料的棘轮的行为特征<sup>[9]</sup>。在应力水平相对较小时, 棘轮应变率在一定的循环周次后几乎下降为零。但随着幅值应力  $\sigma_a$  逐级增大, 棘轮行为将在前一级棘轮安定的情况下再次发生, 这说明幅值应力与棘轮行为的开动有关, 每一级的棘轮饱和都是 AZ91D 镁合金循环硬化与幅值应力相匹配的结果。比较第 2 级和第 6 级加载发现, 尽管两者的幅值应力相同, 但其棘轮行为明显不同。第 6 级加载时的棘轮应变—循环周次关系曲线斜率很小, 即棘轮应变率近似为一个接近零的常值。由此可见, 先前大的幅值应力加载历史会抑制后续小的幅值应力的循环棘轮行为的产生。研究表明, 经较大幅值的应力循环后材料内部位错密度升高, 材料产生了较大的循环硬化, 变形阻力增加<sup>[1, 14]</sup>, 这就

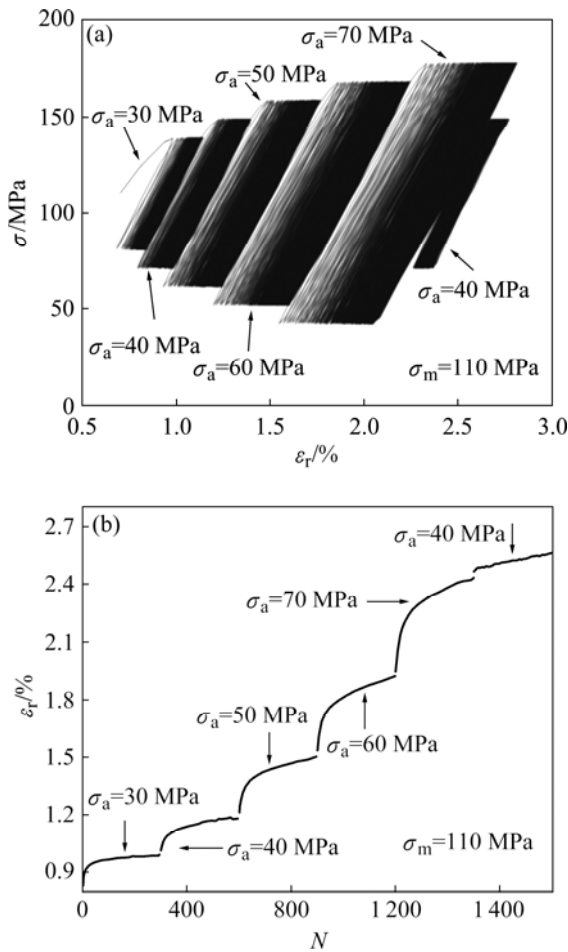


图 2 幅值应力控制条件下 AZ91D 镁合金的  $\sigma-\varepsilon_r$  曲线和  $\varepsilon_r-N$  曲线

Fig.2 Curves of  $\sigma-\varepsilon_r$  and  $\varepsilon_r-N$  (b) for AZ91D magnesium alloy under stress cycling at different stress amplitudes

可能使后续较小的应力幅值循环下的棘轮应变率明显下降。具体原因需进一步研究。

图 3 所示为 AZ91D 镁合金的饱和棘轮应变—幅

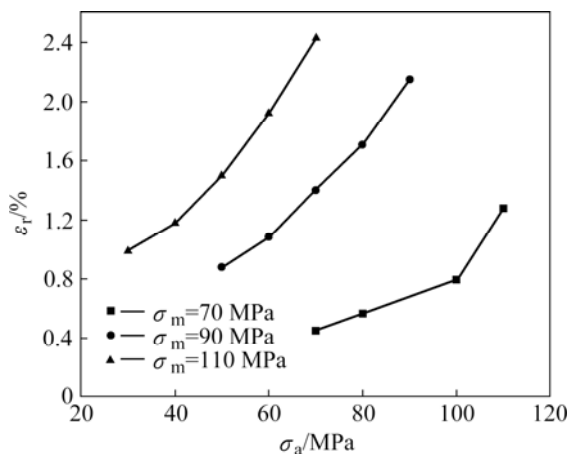


图 3 AZ91D 镁合金的  $\varepsilon_r-\sigma_a$  曲线

Fig.3 Curves of  $\varepsilon_r-\sigma_a$  for AZ91D magnesium alloy

值应力曲线。由图 3 可知，随着幅值应力的增大，饱和棘轮应变增大。同时可以发现应变的增幅越来越大，即随着幅值应力增大，棘轮应变率水平随之增大。

### 2.2 不同平均应力以及加载历史对棘轮行为的影响

平均应力是循环过程中不被抵消的那部分静载荷，平均应力的存在导致循环加载时应力应变滞后回环的“循环蠕变”，因而出现棘轮行为<sup>[15]</sup>。当平均应力逐级增大时，AZ91D 镁合金的应力—应变曲线和棘轮应变—循环周次曲线如图 4 所示。由图 4 可知，棘轮应变  $\varepsilon_r$  和棘轮应变率  $d\varepsilon_r/dN$  随平均应力的提高均增大。但在同一加载情况下，不论平均应力的大小如何，棘轮应变  $\varepsilon_r$  产生并随循环次数  $N$  的增加而增大，棘轮应变率都随循环次数的增加而下降，在循环饱和时变为零。第 6 级循环加载时，棘轮行为明显受到了先前较大平均应力加载历史的抑制，没有第 2 级时那么明显。这主要是因为较大平均应力作用下产生较强的

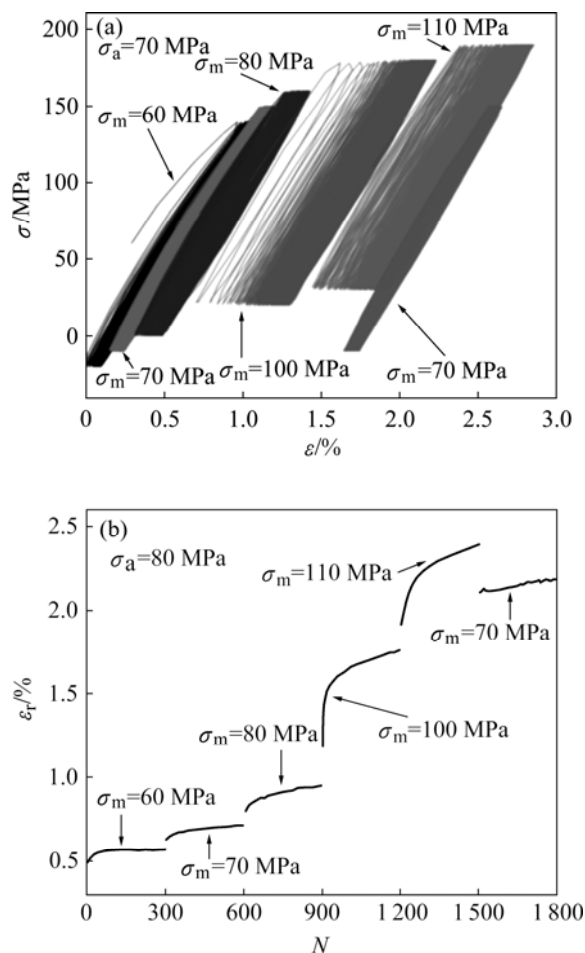


图 4 不同平均应力控制条件下 AZ91D 镁合金的  $\sigma-\varepsilon$  曲线和  $\varepsilon_r-N$  曲线

Fig.4 Curves of  $\sigma-\varepsilon$  (a) and  $\varepsilon_r-N$  (b) under stress cycling at different mean stresses

循环硬化<sup>[16]</sup>。这表明 AZ91D 镁合金在平均应力历史也具有与应力幅值历史加载条件下相同的棘轮行为特征。此外, 比较图 2(b)和图 4(b)可以看出, 图 2 中加载工况由于平均应力恒定, 棘轮应变连续变化; 图 4 中加载工况平均应力逐级改变, 棘轮应变—循环周次曲线出现间断即棘轮应变有一突然改变, 这是由于某一方应力明显增大而在该方向产生较大塑性应变所带来的必然结果。同时也说明平均应力决定了棘轮应变的水平。

进一步的实验也表明, 平均应力  $\sigma_m$  对饱和棘轮应变起决定性作用。饱和棘轮应变—平均应力关系如图 5 所示。由图 5 可知, 实验点集中在狭窄的带状区域内, 饱和棘轮应变随平均应力单调上升, 这进一步说明平均应力决定了棘轮应变水平。

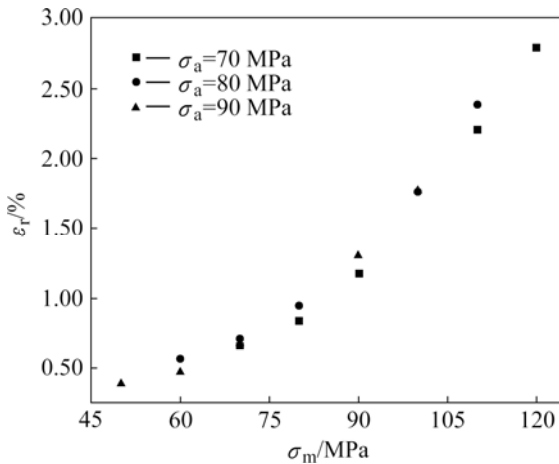


图 5 AZ91D 镁合金的  $\epsilon_r$ — $\sigma_m$  曲线  
Fig.5 Curves of  $\epsilon_r$ — $\sigma_m$  for AZ91D magnesium alloy

加载历史也是影响材料棘轮行为的重要因素, 具有不同先前低应力加载历史对后续棘轮行为也会产生影响。如第 4 号工况第 5 级循环加载和第 5 号工况第 4 级循环, 其加载应力控制条件相同, 都在  $\sigma_m=110$  MPa,  $\sigma_a=70$  MPa 的条件下完成的。但稳定时后者的应变明显低于前者的, 且循环几周后棘轮应变率趋于稳定时的棘轮应变也不相同。上述现象说明 AZ91D 镁合金棘轮行为具有加载历史依赖性。

### 2.3 峰值应力和应力比的棘轮实验结果

不同应力比时 AZ91D 镁合金的应力—应变曲线和棘轮应变—循环周次曲线如图 6 所示。由图 6 可见, 在峰值应力  $\sigma_p$  一定的情况下, 应力比  $R$  其实反映了平均应力  $\sigma_m$  和幅值应力  $\sigma_a$  的组合。随着应力比  $R$  的增大, 平均应力  $\sigma_m$  增大。由在图 6(b)可以看出, 棘轮应

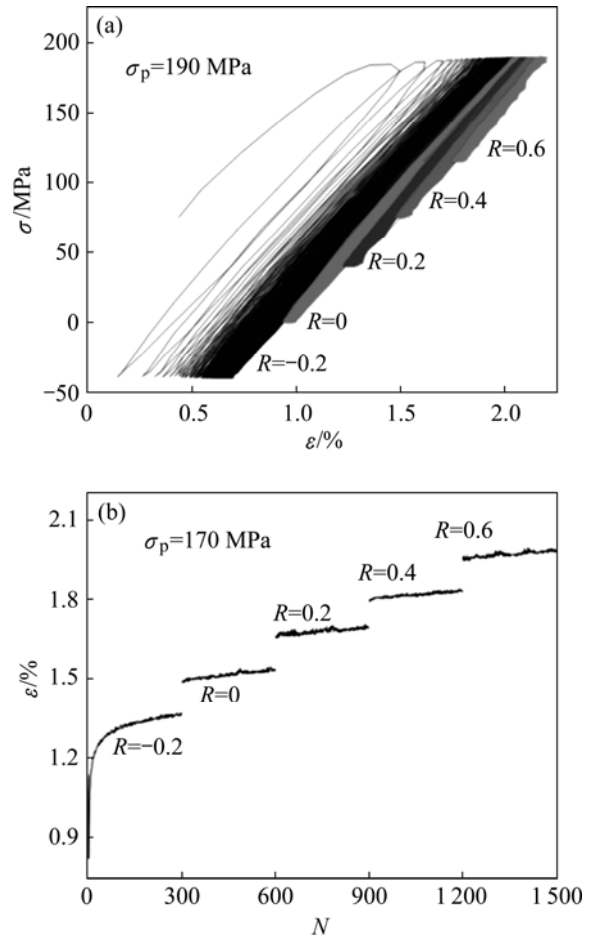


图 6 不同控制应力比时 AZ91D 镁合金的  $\sigma$ — $\epsilon_r$  和  $\epsilon_r$ — $N$  曲线  
Fig.6 Curves of  $\sigma$ — $\epsilon_r$  and  $\epsilon_r$ — $N$  under stress cycling for AZ91D magnesium alloy at different  $R$  values

变水平逐级增大。但除了第 1 级循环加载棘轮应变经历了快速上升, 增速逐渐减缓的安定过程外, 其它各级加载的应变率很小, 工件的棘轮行为极不明显。这是因为与棘轮行为开动有关的幅值应力  $\sigma_a$  随应力比  $R$  的增大而减小。

饱和棘轮应变—应力比曲线如图 7(a)所示。由图 7(a)可知, 峰值应力一定的情况下, 饱和棘轮应变与应力比  $R$  近似呈线性关系。这主要是因为决定应变水平的平均应力  $\sigma_m$  与应力比  $R$  呈现线性关系。

AZ91D 镁合金的  $\epsilon_r$ — $R$  曲线和  $\epsilon_r$ — $\sigma_p$  曲线如图 7(b)所示。图中曲线 1、2 和 3 分别代表 7、6 和 5 号工况。由图 7(b)可知, 棘轮行为存在峰值应力门槛值。棘轮行为能否发生, 存在峰值应力的下限值<sup>[7]</sup>。这是因为如果峰值应力过小, 将不足以在每一循环周次内产生塑性变形的定向累积, 也就不存在棘轮行为。

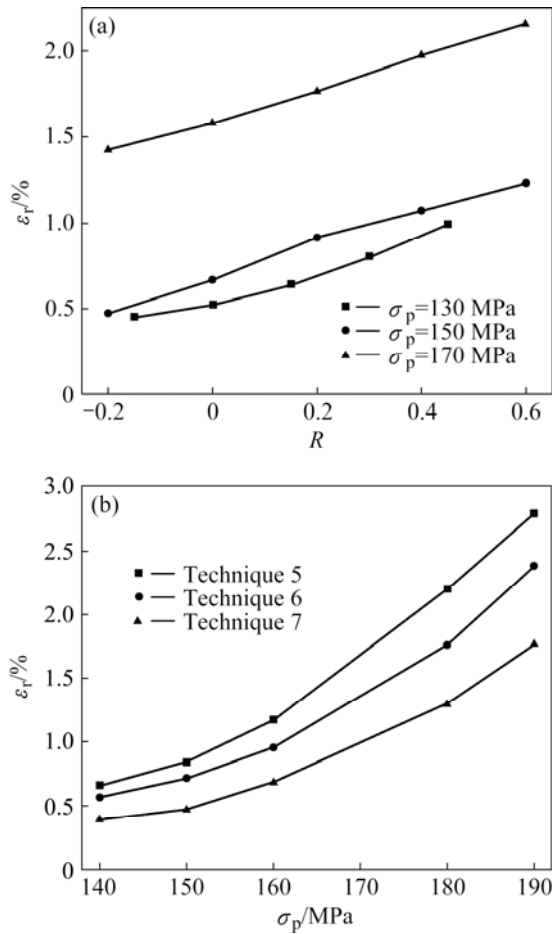


图7 AZ91D 镁合金的  $\epsilon_r-R$  和  $\epsilon_r-\sigma_p$  曲线  
 Fig 7 Curves of  $\epsilon_r-R$  and  $\epsilon_r-\sigma_p$  for AZ91D magnesium alloy

根据图7所示实验点所具有的抛物律趋势,可假定材料单轴棘轮变形满足如下方程:

$$\epsilon_r = \alpha_r \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{0.2}}\right)^2 + k_r \frac{\sigma_r}{\sigma_{0.2}} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_r$  和  $k_r$  为棘轮系数;  $\sigma_r$  为棘轮应力,其定义如下:

$$\sigma_r = \begin{cases} \sigma_p - \sigma_{rth} & (\epsilon_{r,s} > 0) \\ \sigma_v - \sigma_{rth} & (\epsilon_{r,s} < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{rth}$  称为棘轮门槛值,它取为抛物律曲线与应力轴相交的棘轮应力值;  $\sigma_v$  为谷值应力。

棘轮应力  $\sigma_r$  为峰值真应力的增量,具有对棘轮变形控制的一元应力特性。对于特定材料,  $\alpha_r$ 、 $k_r$  和  $\sigma_{rth}$  是唯一确定的材料常数。抛物循环饱和棘轮本构模型(1)可用于预测单轴循环应力条件下的最大棘轮应变,故称为饱和棘轮本构模型,简称为 SRM(Saturated

ratcheting model)模型<sup>[17]</sup>。

当  $\sigma_r > 0$  时(见图7),AZ91D 镁合金的 SRM 本构模型可由多级循环应力饱和实验数据通过抛物律方程(1)拟合获得 5、6 和 7 工况下的参数,结果如表 1 所列。

表1 AZ91D 镁合金的饱和棘轮一元本构模型参数

Table 1 Parameters of AZ91D magnesium alloy by unitary constitutive model

Technique No.	$\sigma_{rth}/\text{MPa}$	$\alpha_r$	$k_r$
5	58	10.13	-17.98
6	58	13.05	-23.34
7	55	12.15	-20.27

事实上,对于幂律材料,单调拉伸曲线的应力从弹性加载部分到达名义屈服应力  $\sigma_{0.2}$ ,且不同程度地存在非线性塑性变形,因此,反映塑性起点的棘轮门槛应力,对应的单轴应变应低于名义屈服应变。应当指出,考虑到工程材料性能存在分散性,门槛值  $\sigma_{rth}$  应当是名义材料常数。对于多数材料,在尚未由实验得到精确的门槛应力时,屈服强度可作为棘轮门槛应力  $\sigma_{rth}$  的近似估计值。

2.4 饱和棘轮应变与平均应力和应力幅值的关系

从图5和7可见,饱和棘轮应变受峰值应力影响,但 AZ91D 镁合金的饱和棘轮应变与峰值应力并不一一对应,如工况 5、6 和 7 中当  $\sigma_m$  分别为 70 MPa、80 MPa 和 90 MPa,  $\sigma_a$  分别为 70、60 和 50 MPa 时  $\sigma_p$  均为 140 MPa,但  $\epsilon_r$  分别为 0.66%、0.566%和 0.391%。根据图5和7的曲线形式可以判断 AZ91D 镁合金的  $\epsilon_r$  与  $\sigma_m$ 、 $\sigma_a$  存在二元关系,假设  $\epsilon_r$  与  $\sigma_m$ 、 $\sigma_a$  存在如下关系:

$$\epsilon_r = a_0 + a_1\sigma_m + a_2\sigma_a + a_3\sigma_m\sigma_a + a_4\sigma_m^2 + a_5\sigma_a^2 \quad (3)$$

根据图5的实验数据,采用最小二乘法可得

$$\epsilon_r = -1.4816 + 0.1015\sigma_m - 0.0739\sigma_a + 0.0003\sigma_m\sigma_a - 0.0007\sigma_m^2 + 0.0005\sigma_a^2 \quad (4)$$

为验证上式的正确性,将工况 5、6 和 7 的实验数据代入式(4),所得结果如表 2 所列。由表 2 可知,最大误差只有 5.7%,误差较小,表明式(3)能够反映 AZ91D 镁合金的  $\epsilon_r$  与  $\sigma_m$ 、 $\sigma_a$  的关系。这也表明  $\sigma_m$  和  $\sigma_a$  是决定  $\epsilon_r$  的关键,即表明饱和棘轮应变  $\epsilon_r$  和受到的力有很大的关系,只要确定了施加的力,  $\epsilon_r$  也就确定

表2 AZ91D 镁合金的饱和棘轮二元本构模型及预测结果

Table 2 Binary constitutive equation of AZ91D and forecasting results

Technique No.	$\sigma_m$ /MPa	$\sigma_a$ /MPa	$\varepsilon_r$ /%		
			Exp.	Cal.	$E$
5	70	70	0.66	0.633	4.1
	70	80	0.839	0.859	-2.4
	70	90	1.171	1.191	-1.7
	70	110	2.206	2.169	1.7
	70	120	2.792	2.816	-0.9
6	80	60	0.566	0.567	-0.2
	80	70	0.713	0.713	0
	80	80	0.95	0.964	-1.5
	80	100	1.76	1.782	-1.3
7	80	110	2.386	2.349	1.6
	90	50	0.391	0.407	-4.1
	90	60	0.472	0.473	-0.2
	90	70	0.683	0.644	5.7
	90	90	1.301	1.302	-0.1
	90	100	1.769	1.789	-1.1

$$E = \frac{(\varepsilon_{r,exp} - \varepsilon_{r,cal})}{\varepsilon_{r,exp}} \times 100\%$$

了,并且符合式(3)的关系。同时由饱和棘轮应变和峰值应力没有一一关系,可以推测,加载方式对饱和棘轮应变也会有很大影响。不同的加载路径和加载方式都会对饱和棘轮应变的大小产生较大影响。

### 3 结论

1) 在其它条件不变时,随着幅值应力  $\sigma_a$  和  $\sigma_m$  增大,棘轮应变率也越大,幅值应力  $\sigma_a$  对棘轮行为的启动起作用。AZ91D 镁合金的棘轮行为依赖于循环加载历史,之前的棘轮饱和会对后续较低加载水平的棘轮行为产生抑制。之前的低应力加载历史对后续的棘轮行为也会产生影响。

2) 峰值应力一定时,随着应力比  $R$  的增大,棘轮应变不断累积,但后续各级循环加载时的棘轮行为并不明显,且饱和棘轮应变与应力比呈简单的线性关系。

3) 在其它条件不变的情况下,峰值应力越大,每一循环周次内的最大塑性应变越大,饱和棘轮应变水平越高,棘轮行为存在峰值应力门槛值,只有峰值应

力超过该门槛值,棘轮行为才能发生。

4) AZ91D 镁合金的  $\varepsilon_r$  与  $\sigma_p$  并不一一对应。 $\varepsilon_r$  与  $\sigma_m$ 、 $\sigma_a$  的关系为:  $\varepsilon_r = -1.4816 + 0.1015\sigma_m - 0.0739\sigma_a + 0.0003\sigma_m\sigma_a - 0.0007\sigma_m^2 + 0.0005\sigma_a^2$ 。

### REFERENCES

- [1] WU L, JAIN A, BROWN D W. Twinning-detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy ZK60A[J]. Acta Mater, 2008, 56(4): 688-695.
- [2] CLIFF J L, DEVARAJ D, STEVEN M A. Experimental investigation of cyclic and time-dependent deformation of titanium alloy at elevated temperature [J]. Int J Plasticity, 2007, 23(1): 1-24.
- [3] CARTER P. Analysis of cyclic creep and rupture. Part 1: bounding theorems and cyclic reference stresses[J]. Int J Pressure Vessels Piping, 2005, 82(1): 15-26.
- [4] EISENMEIER G, HOLZWARTH B, HÖPPEL H W, MNGHRBI H. Cyclic deformation and fatigue behaviour of the magnesium alloy AZ91[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 319/321: 578-582.
- [5] SATYADEVI A, SIVAKUMAR S M, BHATTACHARYA S S. A new failure criterion for materials exhibiting ratcheting during very low cycle fatigue[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 452/453: 380-385.
- [6] FATEMI A, YANG L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials[J]. Int J Fatigue, 1998, 20(1): 9-34.
- [7] LEE H Y, KIM J B, LEE J H. Evaluation of progressive inelastic deformation induced by a moving axial temperature front for a welded structure [J]. Int J Pressure Vessels Piping, 2004, 81(5): 433-441.
- [8] 刘宇杰. 金属材料的棘轮行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.  
LIU Yu-jie. Ratcheting of metal materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [9] 康国政. SiC<sub>p</sub>/6061Al 合金复合材料的高温单轴棘轮行为及其时间相关特性[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 1-8.  
KANG Guo-zheng. Uniaxial ratcheting of SiC<sub>p</sub>/6061Al alloy composites and its time-dependent at high temperature[J]. Acta Material Compositae Sinica, 2006, 23(2): 1-8.
- [10] VELAY V, BERNHART G, PENAZZI L. Cyclic behavior modeling of a tempered martensitic hot work tool steel[J]. Int J Plasticity, 2006, 22: 459-496.
- [11] 杨显杰, 高庆, 向阳开, 蔡力勋. 紫铜的非比例循环塑性变

- 形行为实验研究[J]. 金属学报, 1998, 34(10): 1055-1060.
- YANG Xian-jie, GAO Qing, XIANG Yang-kai, CAI Li-xun. An experimental study on the nonproportional cyclic plastic deformation behaviour of pure copper[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(10): 1055-1060.
- [12] MORRISSEY R J, MCDOWELL D L, NICHOLAS T. Microplasticity in HCF of Ti-6Al-4V[J]. Int J Fatigue, 2001, 23: 55-64.
- [13] 李淑波, 皱志文, 吴 昆, 郑明毅, 熊守美. AZ91D 镁合金高温压缩过程中的微观组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1041-1046.
- LI Shu-bo, ZOU Zhi-wen, WU Kun, ZHENG Ming-yi, XIONG Shou-mei. Microstructure evolution of AZ91D magnesium alloy during high temperature compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1041-1046.
- [14] YIN S M, YANG H J, LI S X. Cyclic deformation behavior of as-extruded Mg-3%Al-1%Zn[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(9): 751-754.
- [15] SHASHWAT S, SOMNATH G. Modeling cyclic ratcheting based fatigue life of HSLA steels using crystal plasticity FEM simulations and experiments[J]. Int J Fatigue, 2006, 28: 1690-1704.
- [16] 康国政, 高 庆, 杨显杰. 不同材料的室温单轴应变循环特性和棘轮行为研究[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 608-612.
- KANG Guo-zheng, GAO Qing, YANG Xian-jie. Study on uniaxial strain cyclic behavior and ratcheting at room temperature for different metals[J]. J Mech Strength, 2002, 24(4): 608-612.
- [17] 蔡力勋, 牛清勇, 刘宇杰. 描述不锈钢材料单轴棘轮行为的一元参量体系[J]. 金属学报, 2002, 38(9): 966-973.
- CAI Li-xun, NIU Qing-yong, LIU Yu-jie. Methodological system to describe uniaxial ratcheting behavior of stainless steel by unitary parameter[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(9): 966-973.

(编辑 龙怀中)