

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.009

挤压 ZK60 镁合金的循环变形与疲劳行为研究*

柯云舒, 龚兴华, 杨增远

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对挤压 ZK60 镁合金在循环变形过程中变形机制开启的问题,在室温下对试样进行了应变控制($R_\varepsilon = -1$)下的单轴疲劳试验,得到了总应变幅为 0.25% ~ 5% 下的半寿命时的稳定应力-应变滞回曲线和应变幅分别为 4%、1% 和 0.35% 时的应力-应变滞回曲线,采用超景深三维显微镜和扫描电子显微镜(SEM)观察试样的疲劳断口形貌,运用了宏观力学性能与微观结构分析相结合的研究方法分析其循环变形过程中的变形机理。研究结果表明:挤压 ZK60 镁合金的循环变形行为可分为 3 个不同的部分,应力-应变滞回曲线和疲劳断口形貌随应变幅的变化而变化明显,导致这些差异主要原因是循环变形过程中变形机制的不同。

关键词: ZK60 镁合金; 循环变形; 疲劳; 微观结构

中图分类号: TH140.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)12-1412-06

Cyclic deformation and fatigue properties for extruded ZK60 magnesium alloy

KE Yun-shu, GONG Xin-hua, YANG Zeng-yuan

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problems of the deformation mechanism in cyclic deformation for extruded ZK60 magnesium alloy, strain-controlled (the strain ratio is $R_\varepsilon = -1$) cyclic loading experiments were carried out at room temperature obtaining stabilized stress-strain hysteresis loops at half-fatigue lives with strain amplitude ranging from 0.25% ~ 5% and cyclic stress-strain hysteresis loops at strain amplitudes of 4%, 1% and 0.35%, respectively. The super depth of field three-dimensional microscope and the scanning electron microscope (SEM) were used to investigate the fatigue fracture, researching cyclic deformation mechanism by the analysis of macro-mechanical properties and microstructure. The experimental results show that the cyclic deformation behavior for extruded ZK60 magnesium alloy can be divided into three parts. The stress-strain curves and fracture morphology changed with strain amplitude obviously mainly because of the different deformation mechanism during cyclic deformation.

Key words: ZK60 magnesium alloy; cyclic deformation; fatigue; microstructure

0 引言

相比传统结构材料,镁合金具有低密度、比强度高、刚度高和优良的可回收性等潜在优点,被广泛应用于交通、航空航天、3C 产品等领域^[1-3]。具有独特的 hcp 晶格结构,在室温下可开启的滑移系主要为 {0002} 基面滑移,非基面滑移很难发生。除滑移外,

孪生作为另一种重要的变形机制可协调室温下 c 轴的应变,产生的主要孪晶系统有 {10-12} 拉伸孪晶、{10-11} 压缩孪晶和 {10-11} - {10-12} 双孪晶^[4]。研究表明平行于晶粒 c 轴拉伸或垂直 c 轴压缩易产生 {10-12} 拉伸孪晶;而平行于 c 轴压缩或垂直于 c 轴拉伸则易激发 {10-11} 压缩孪晶产生^[5-6]。

收稿日期: 2017-03-21

基金项目: 浙江省新苗人才计划资助项目(2016R403077)

作者简介: 柯云舒(1990-),女,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事镁合金力学性能方面的研究。E-mail: keyunshu@126.com

镁合金作为一种结构材料,大多应用在循环载荷作用的工作环境中,其主要失效形式为疲劳。因此,本文将研究镁合金的循环变形与疲劳行为并分析其损伤机理,了解孪生与位错滑移在镁合金循环变形和疲劳中的作用。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

实验材料为直径 76 mm 的挤压 ZK60 镁合金商业棒材,其化学成分(质量分数,%)为:Zn5.0,Zr0.64,Mg 余量。试样为平行于挤压方向(ED)的圆棒试样,3 类试样的取样示意图如图 1 所示。

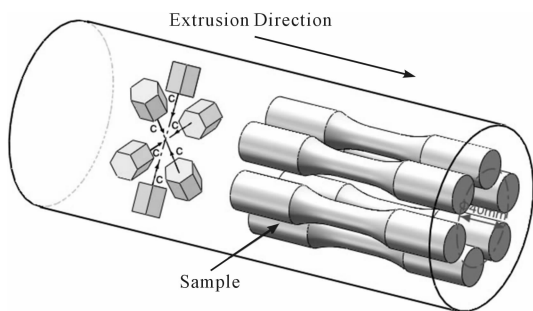


图 1 3 类试样的取样示意图

试样的轴沿直径 40 mm 的环形均布,其标距段长度为 15 mm,直径为 10 mm。试验前,将试样的标距段及过渡圆弧部分用 240 目~1 500 目的砂纸分级进行打磨,去除机械加工产生的残余应力。

1.2 试验方法

在室温条件下,所有的疲劳试验均在 Instron 液压伺服试验机上进行。本研究对试样在 $R_e = -1$ 时进行应变控制下的单轴疲劳试验,加载频率为 0.05 Hz ~ 10 Hz,应变幅变化范围为 5% ~ 0.25%。试验后通过自行编制的软件处理获得对应的宏观力学性能曲线。

本研究采用 VHX-700 超景深三维显微镜观测不同应变幅下的疲劳断口的宏观形貌。采用扫描电子显微镜观测试样在不同应变幅下的疲劳断口的微观形貌。从而对循环加载过程中的微观结构的演变进行进一步的研究与分析。

2 试验结果

2.1 原始试样

ZK60 镁合金初始试样在光学显微镜(OM)下的三维微观结构特征,如图 2 所示。

从图 2 中可见,在垂直于 ED 方向截面的微观结

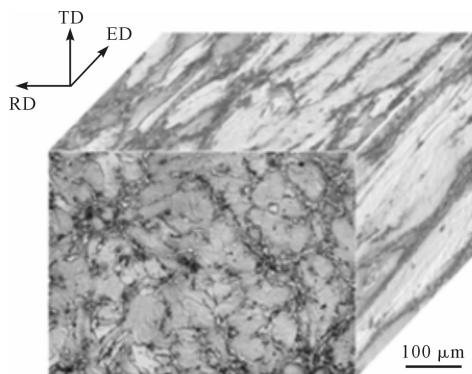


图 2 ZK60 镁合金的三维金相微观结构

构中,同时存在着许多大晶粒和小晶粒且分布不均匀。其中,大晶粒呈拉长状,平均尺寸约为 50 μm ;小晶粒呈等轴状,平均尺寸约为 8 μm 。从平行于 ED 方向的 ED-TD 平面和 ED-RD 平面可以看出,挤压 ZK60 镁合金具有条带状纤维组织特征且没有观察到孪晶。

2.2 循环变形行为

2.2.1 稳定应力-应变滞回线

ZK60 镁合金试样在总应变幅为 0.25% ~ 5% 下的半寿命时的稳定应力-应变滞回线,如图 3 所示。

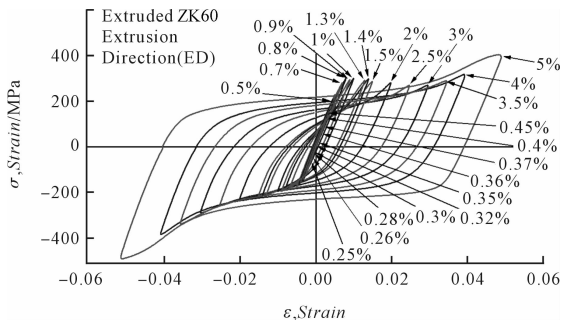


图 3 稳定应力-应变滞回线

从图 3 中可以看到:应变幅大小对试样的应力-应变滞回线的形状影响明显。根据稳定应力-应变滞回线的形状、应力幅和平均应力随加载周期的变化以及相关的变形机制,将循环变形行为分为 3 个不同的部分。

当应变幅大于 2% 时,应力-应变滞回线在压缩和拉伸阶段均显示为“S”形曲线,并且随着应变幅的增大,应力-应变滞回线的对称趋势更为明显。当处于大应变幅值时,在反向压缩过程中的应变硬化率很高逐渐降低至接近零,随后又逐渐升高,这表明有大量孪晶产生且孪生可能在达到最大应变时已经结束,并且随后可能产生了非基面滑移^[7]。而在反向拉伸过程中,可能在应变达到可控的最大值前就已经完成退孪生。因此,非基面滑移可能在反向拉伸结束前开启。

当应变幅在 0.35% ~ 2% 之间时,可以观察到明显的拉伸-压缩不对称现象,并且随着应变幅值的增

加,不对称程度更加明显。应力-应变曲线在拉伸阶段表现为“S”形曲线,而在压缩阶段表现为凹面向上的形状。这种明显的不对称形状表明在压缩时有孪生生成且孪生没有被耗尽,而在反向拉伸时产生完全退孪生行为,这被称为“部分孪生-退孪生”^[8]。

当应变幅小于或等于 0.35% 时,应力-应变滞回曲线呈对称形状,表明基面滑移为主要循环变形机制。

2.2.2 应力-应变滞回线的演化

试样在应变控制下应变幅分别为 4%、1% 和 0.35%, 其应力-应变滞回线的演化如图 4 所示。

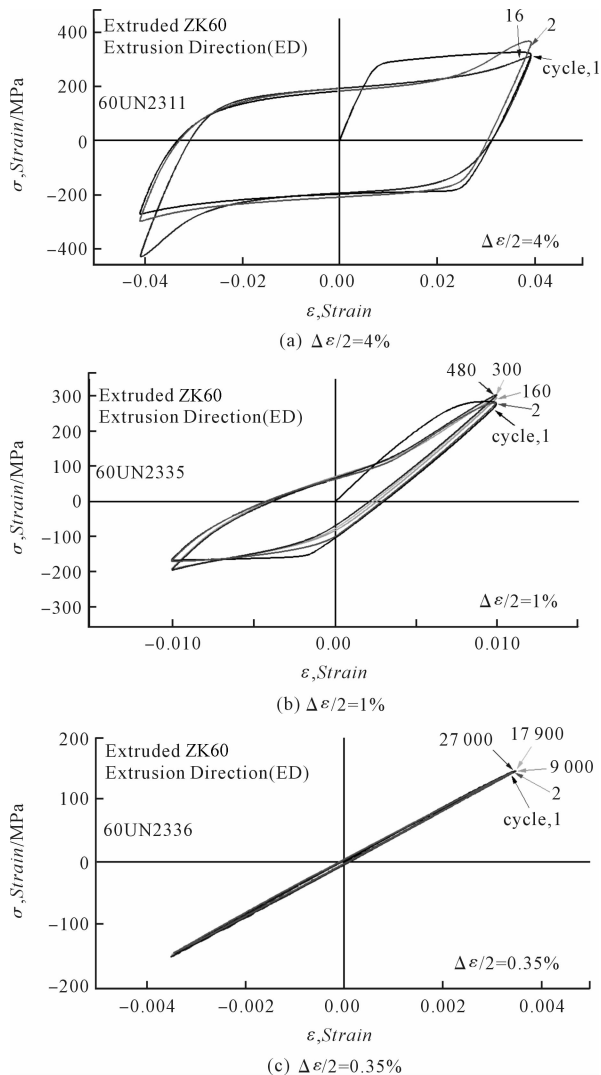


图 4 不同应变幅下的应力-应变滞回线

为了更好地解释演化过程,图 4 中同时放入第一周期、第二周期、四分之一周期、半寿命周期和四分之三周期的应力-应变滞回线。可以明显地发现,应变幅对滞回曲线的形状影响很大:

(1) 当在大应变幅 4% 时,如图 4(a) 所示,初始拉伸阶段应力-应变滞回线表现出凹面向下的特征。第一循环周期的拉伸峰值应力(326 MPa)和压缩峰值应

力(-188 MPa)分别高于单调拉伸屈服应力(267 MPa)和单调压缩屈服应力(-159 MPa)。在第一循环周期的弹性极限前,应变硬化率一直保持一个较高的值。在弹性极限后,应变硬化率保持一个几乎恒定且较低的值,此时基面滑移为主要的变形机制。当达到拉伸屈服点后,应变硬化率出现明显下降,这可能是因为单轴拉伸不易产生孪晶,此时最大拉伸应力为 326 MPa。在反向压缩时,当应力值从最大拉伸应力下降到约 100 MPa 时,线弹性变形结束且应力-应变滞回曲线表现出非线性的特点。随着压缩屈服强度到达 -188 MPa,可以观察到应变硬化率接近零,这很可能与孪生被激发有关^[9]。随后,应变硬化率一直保持较低的值后压缩应力值出现明显增加,表明孪生可能已经结束且开启了非基面滑移机制。当试样加载至第二循环周期的反向拉伸时,应力-应变曲线表现为“S”型曲线,应变硬化率在从几乎为零后快速上升,这很可能是由于退孪生在反向拉伸时开启且当完全退孪生后产生了非基面滑移机制。当循环加载至 16 周(疲劳寿命的四分之三)时,应力-应变滞回线表现为几乎对称的形状。在反向拉伸和压缩时其应力-应变曲线均呈“S”型,表现出“完全孪生-退孪生”的现象。此外,平均应力在第二循环周期比第一循环周期时大,表现为循环硬化。而在 16 周时的平均应力为负值,表现为循环软化。随着循环周期增加,平均应力在略微上升后出现明显下降,这是由于在大应变幅下,试样在循环加载的初始阶段就产生了疲劳裂纹^[10]。

(2) 当应变幅值为 1% 时,如图 4(b) 所示,应力-应变滞回线在整个加载过程中都表现出不对称的特点。应力-应变滞回线在第一循环周期的初始拉伸阶段表现出凹面向下的特征。在第一循环周期压缩峰值应力和拉伸峰值应力分别为 -166 MPa 和 284 MPa,分别与单调压缩屈服应力(-159 MPa)和单调拉伸屈服应力(267 MPa)很接近。在反向压缩时,应力-应变曲线呈现凹面向上的形状,而当反向拉伸时,应力-应变曲线呈现“S”形。也就是说,在反向压缩时孪生没有耗尽基体,而反向拉伸时退孪生则完成并随后可能产生非基面滑移,表现出“部分孪生-退孪生”的现象。当加载周期在四分之一寿命时,反向压缩曲线呈凹面向上,之后出现略微凹面向下的特征。随着加载周期的增加,从而应力-应变滞回曲线形状由不对向对称变化,拉伸和压缩峰值应力有所增加。此外,在循环加载过程中,最大拉伸应力值高于最大压缩应力值,平均应力始终为正值。

(3) 当应变幅为 0.35% 时,如图 4(c) 所示,应力-

应变滞回线表现出基本对称的特征,循环变形过程近似为弹性变形,没有明显的循环硬化现象,平均应力则随循环周期增加几乎都为零。在压缩时,最大压缩应力值为 -146 MPa ,低于压缩屈服强度。这是因为在整个加载过程中没有出现孪生-退孪生的过程,也就是说在反向拉伸和压缩过程中的主导变形机制均为位错滑移。

2.3 疲劳断口分析

ED 取向 ZK60 镁合金试样在应变幅为 4%、1% 和 0.35% 时的宏观疲劳断口如图 5 所示。

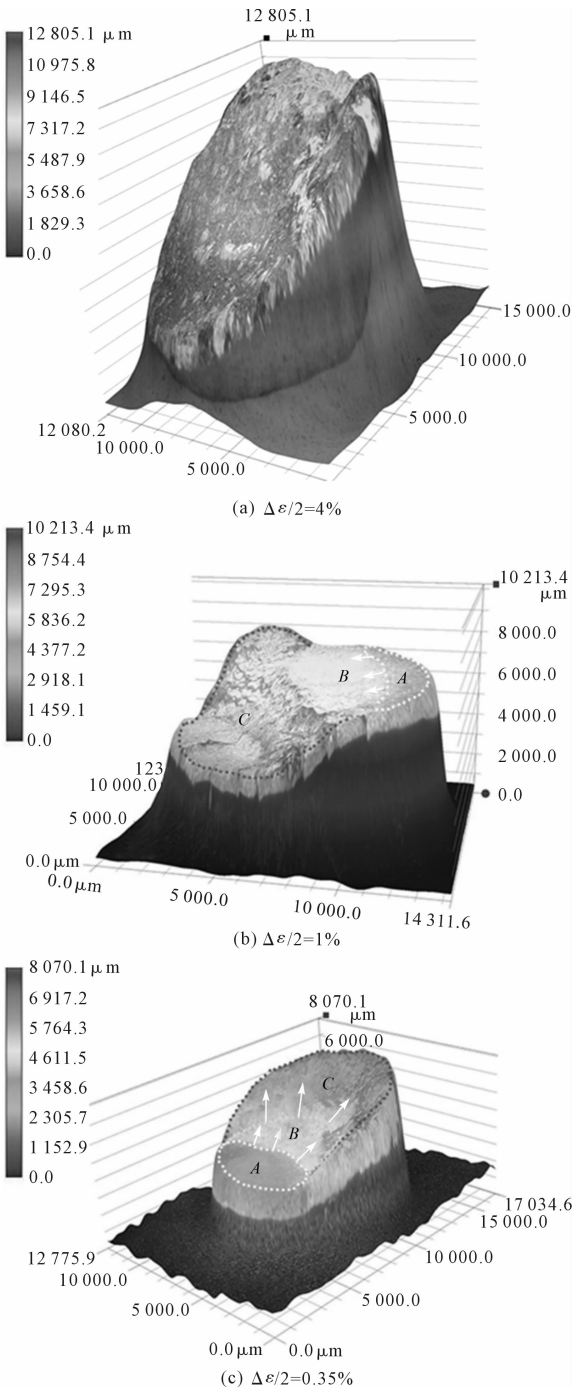


图 5 ZK60 镁合金试样的宏观疲劳断口

本研究将断口分为裂纹启裂区、裂纹扩展区和瞬间断裂区,分别用不同的虚线 and 对应的 A、B、C 区域表示。

ED 取向试样在 SEM 观测下的疲劳断口形貌,对应的应变幅分别为 4%、1% 和 0.35%,如图(6~8)所示。

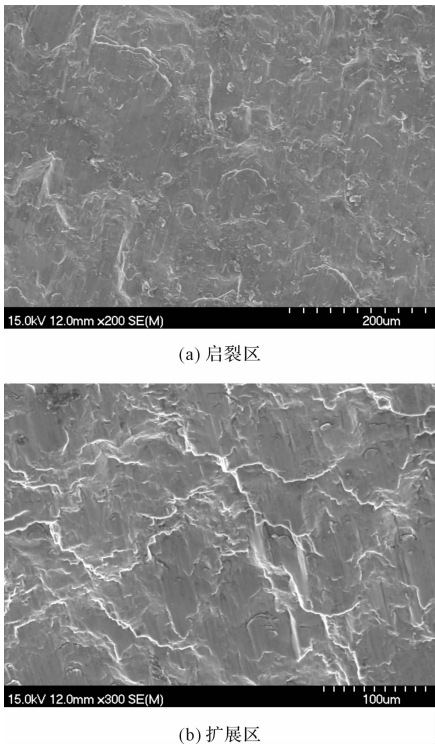


图 6 ZK60 镁合金试样的微观疲劳断口 ($\Delta\varepsilon/2 = 4\%$)

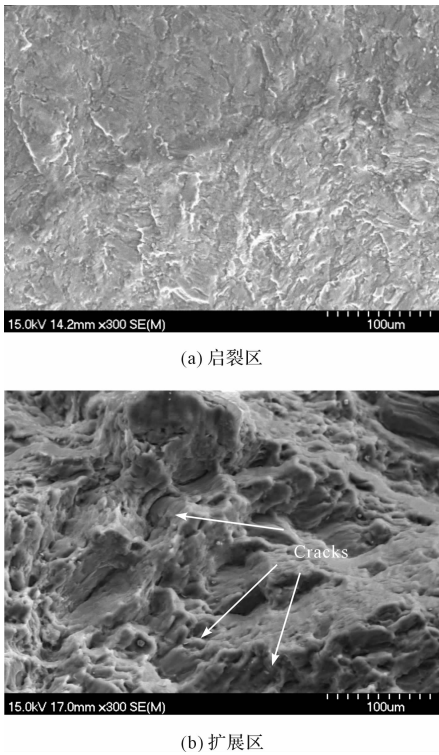
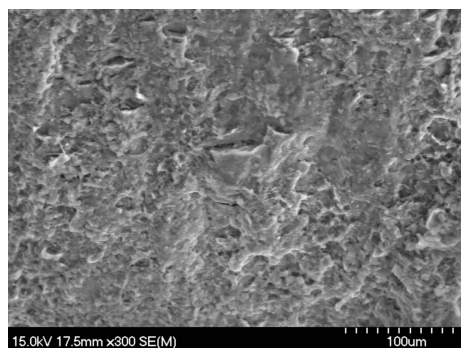
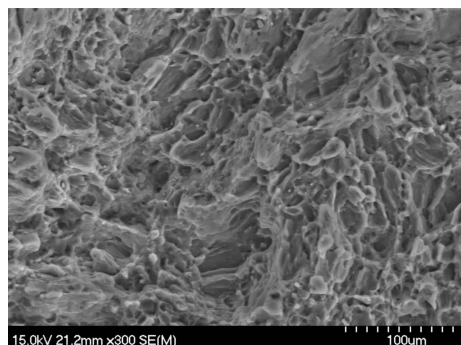


图 7 ZK60 镁合金试样的微观疲劳断口 ($\Delta\varepsilon/2 = 1\%$)



(a) 启裂区



(b) 扩展区

图 8 ZK60 镁合金试样的微观疲劳断口 ($\Delta\varepsilon/2 = 0.35\%$)

可以发现,不同应变幅下的疲劳断口特征明显不同:

(1)当应变幅为 4% 时,如图 5(a) 所示,由于断口形貌是由两个断裂面挤压造成的,疲劳断口表现为斜倾断口,断面的法向与试样的轴向呈一定的锐角角度,不能明显地区分出裂纹启裂区、裂纹扩展区和瞬间断裂区,这与单轴压缩断裂情况十分相似。通过 SEM 观测(见图 6)可以看出,断口的启裂区和裂纹扩展区形貌呈明显的片层状。

(2)当应变幅为 1% 时,如图 5(b) 所示,能从宏观断口形貌上观察到明显的裂纹启裂区(白色虚线区域 A)、裂纹扩展区(灰色虚线区域 B)和瞬间断裂区域(黑色虚线区域 C)。对应地,如图 7(a) 所示,在裂纹启裂区能看到有许多撕裂棱,断口为准解理断裂。此外,如图 7(b) 所示,裂纹扩展区域形貌较为粗糙,能观察到平行裂纹,而这与孪晶界关系密切^[11]。

(3)当应变幅为 0.35% 时,如图 5(c) 所示,能观察到明显可区分的裂纹启裂区(白色虚线区域 A)、裂

纹扩展区(灰色虚线区域 B)和瞬间断裂区域(黑色虚线区域 C)。裂纹启裂区存在撕裂棱,而在裂纹扩展区能发现许多韧窝和细小的孔洞。当在低应变幅时,能观察到有许多疲劳裂纹在试样表面形成,且通常有一条裂纹主导裂纹生长^[12]。

3 结束语

本研究分析了挤压 ZK60 镁合金循环变形过程中的变形机理,得到以下结论:

(1)应力-应变滞回线随应变幅的变化而变化明显。当应变幅大于 2% 时,应力-应变滞回线近似对称。当应变幅在 0.35% ~ 2% 之间,应力-应变滞回线则表现出不对称的特征,拉伸时曲线表现出“S”形,而压缩时则呈凹面向上的形状。当应变幅低于 0.35% 时,应力-应变滞回线表现出对称的特征;

(2)不同应变幅下的疲劳断口特征明显不同。当应变幅为 4% 时,宏观疲劳断口呈倾斜状,断口的启裂区和裂纹扩展区形貌呈明显的片层状。当应变幅为 1% 时,能明显区分宏观断口的裂纹启裂区、裂纹扩展区和瞬间断裂区,裂纹启裂区有许多撕裂棱,裂纹扩展区存在平行裂纹。当应变幅为 0.35% 时,宏观断口的裂纹启裂区、裂纹扩展区和瞬间断裂区区分明显,裂纹启裂区存在撕裂棱,裂纹扩展区存在许多韧窝和细小的孔洞。

参考文献(References):

- [1] FROES F H. Advanced metals for aerospace and automotive use[J]. **Materials Science and Engineering A**, 1994, 184 (2): 119-133.
- [2] FAN C L, CHEN D L, LUO A A. Dependence of the distribution of deformation twins on strain amplitudes in an extruded magnesium alloy after cyclic deformation[J]. **Materials Science and Engineering A**, 2009, 519(1-2): 38-45.
- [3] KULEKCI M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2008, 39(9): 851-865.

(下转第 1445 页)

本文引用格式:

柯云舒, 龚兴华, 杨增远. 挤压 ZK60 镁合金的循环变形与疲劳行为研究[J]. 机电工程, 2017, 34(12): 1412-1416, 1445.

KE Yun-shu, GONG Xin-hua, YANG Zeng-yuan. Cyclic deformation and fatigue properties for extruded ZK60 magnesium alloy[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(12): 1412-1416, 1445.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>