

AZ31 镁合金疲劳裂纹扩展和过载效应

聂德福, 赵 杰

(大连理工大学 材料科学与工程学院 三束材料改性国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要: 研究 AZ31 镁合金不同方向的力学性能、疲劳裂纹扩展行为和单峰过载效应以及载荷比对疲劳裂纹扩展速率的影响。结果表明: 不同方向材料的抗拉强度相当, 而屈服强度差别较大; 不同方向疲劳裂纹扩展行为存在差异, 是由于屈服强度不同所致, 归一化后差别消失; 当应力强度因子范围相同时, 疲劳裂纹扩展速率随载荷比的降低而降低; 单峰过载时, 疲劳裂纹向前扩展一段距离并偏离原扩展方向, 导致随后裂纹扩展迟滞, 这是由于过载增大残余压应力和裂纹出现偏折的结果。

关键词: AZ31 镁合金; 疲劳裂纹; 单峰过载效应; 屈服强度

中图分类号: TG 111.8

文献标识码: A

Fatigue crack growth and overload effect in AZ31 magnesium alloy

NIE De-fu, ZHAO Jie

(School of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The tensile property, fatigue crack growth behavior and the effect of single overload of AZ31 magnesium alloy and load on fatigue crack growth rate were investigated under different directions. The results show that the ultimate strength has little difference, while the yield strength diverges under various directions, and the difference of fatigue crack growth behavior attributes to the yield strength, which disappears after unification. Under identical ΔK , the fatigue crack growth rate decreases with the decrease of stress ratios. During single overloading, the fatigue crack continues to the propagate and deflects from its original path, and it induces subsequent crack growth retardation due to the increase of compressive residual stress and crack deflection.

Key words: AZ31 magnesium alloy; fatigue crack; single overload effect; yield strength

传统的累积损伤概念指出, 周期性的过载会降低名义无缺陷部件的总体寿命, 而大量的实验观察表明, 周期性的过载可以大幅度提高金属材料的疲劳寿命。这种矛盾主要是由于疲劳裂纹萌生和扩展阶段在总寿命中所占比例不同造成的(传统概念中前者可能高达疲劳总寿命的 90%)^[1]。工程中的结构部件往往是在变幅疲劳条件下服役的, 因此研究疲劳裂纹扩展行为及

过载效应对部件的寿命评估更加具有现实意义。人们已采用铝合金和钢铁为主的面心和体心立方结构材料进行了大量的相关工作, 并提出了许多单一或并存的机制^[2-10]。虽然各有其成功之处, 但在解释某些实验现象时仍存在其局限性, 而关于密排六方结构材料的相关工作研究较少。

金属镁及其合金是典型的密排六方结构材料。由

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50271013)

收稿日期: 2007-09-12; 修订日期: 2007-12-29

通讯作者: 赵 杰, 教授, 博士; 电话: 0411-8470763; 传真: 0411-84709284; E-mail: jiezhao@dlut.edu.cn

于其具有较高的比强度、比弹性模量、阻尼减震性、导热性、静电屏蔽性、机械加工性和极低的密度,且易于回收,被誉为“21世纪绿色工程材料”,在航空、航天、汽车、计算机、通讯和家电等领域具有广阔的应用前景。目前,镁及镁合金材料的研究已成为材料界学者研究的热点^[11-17]。而镁合金在室温下只有3个滑移系,塑性变形较面心和体心立方金属更多的依赖于孪生来进行,其塑性变形能力差、易开裂,严重影响了工业化生产^[13-17]。尤其是对于已存在裂纹的材料,裂纹尖端的三向应力状态会进一步限制塑性变形,在拉应力的作用下,裂纹是否会像面心和体心立方金属材料中那样通过钝化而止裂,而相应的工作未见报道。本文作者选用目前商业化应用最广泛的AZ31镁合金,比较了不同方向及不同载荷比时的疲劳裂纹的扩展行为,以及单峰过载对疲劳裂纹扩展行为的影响,并结合已有的疲劳理论对所得结果进行了系统分析。

1 实验

试样材料选取商用的5 mm厚轧制AZ31镁合金板,主要合金的名义成分为3%Al、1%Zn和0.2%Mn(质量分数),其显微组织如图1所示,其中 x 为长度(a)方向、 z 为宽度(b)方向、 y 为厚度(d)方向。 $z-x$ 面组织由大小不等的等轴晶粒组成,其他两个面沿 y 方向晶粒尺寸较小,且晶粒变形程度非常高,但并未观察到孪晶组织的存在。选用矩形截面($l=30$ mm、 $b=5$ mm、 $d=5$ mm)试样分别测试了平行($z-x$)和垂直($x-z$)于长度方向的拉伸性能。疲劳裂纹扩展及过载实验采用紧凑拉伸(CT)试样,试样开口方向分别平行和垂直于板的纵向,试样的长度($a=40$ mm)、宽度($b=50$ mm)、厚度($d=10$ mm),初始裂纹长度 l_0 为12 mm(线切割)。为了便于观测裂纹长度,将试样进行打磨并抛光。实验在EFH-LM20K1-02液压伺服疲劳实验机上进行,通过光学读数显微镜测量裂纹长度,其读数的最小刻度为0.01 mm。疲劳裂纹扩展实验采用正弦波加载,频率 $f=20$ Hz,载荷比 R 分别为0.1和0.5。单峰过载实验是在恒定 ΔK (选于Paris区内)下疲劳裂纹扩展到一设定长度时,施加较大的 K_{OL} ($K_{OL} > K_{max}$)之后继续进行疲劳裂纹扩展实验。本研究所选基准 $\Delta K=2.5$ MPa·m^{1/2}, $R=0.5$,过载比($\eta=K_{OL}/K_{max}$)为2。应力强度因子按以下公式计算:

$$K = \frac{(2+l/b)F}{B\sqrt{b}(1-l/b)^{3/2}} \times [0.886 + 4.64l/b - 13.32(l/b)^2 + 14.72(l/b)^3 - 5.6(l/b)^4]$$

式中 F 为外力; l 为裂纹长度。

并用JSM-5600LV型扫描电镜观察了过载前后的裂纹和断口形貌。

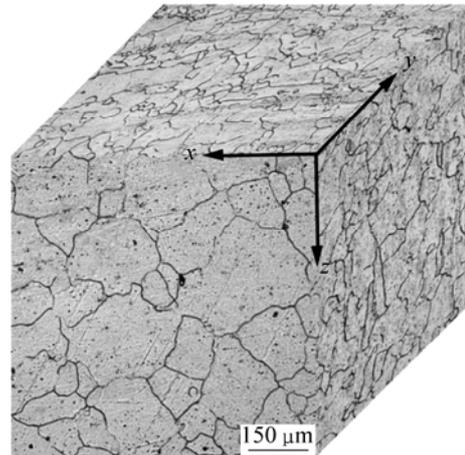


图1 AZ31镁合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of AZ31 Mg alloy

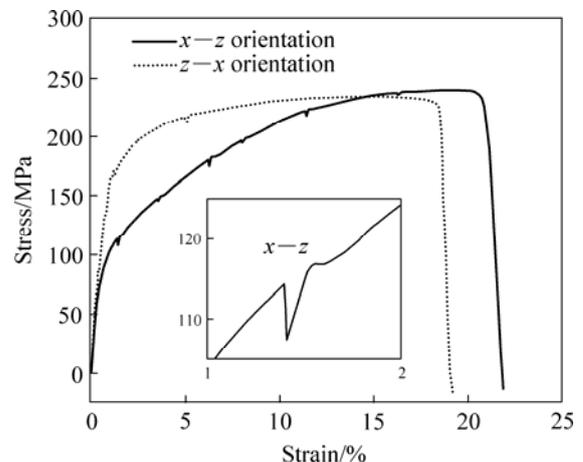


图2 AZ31镁合金不同方向的拉伸曲线

Fig.2 Tensile curves in various directions of AZ31 Mg alloy

2 结果与讨论

2.1 不同方向的拉伸性能

图2所示为AZ31镁合金平行($z-x$)和垂直($x-z$)于长度方向的拉伸曲线。由图2可看出,两个方向上抗拉强度相当,但屈服强度存在明显的差异。 $x-z$ 方向的屈服强度远低于 $z-x$ 方向, $x-z$ 方向伸长率略高于 $z-x$ 方向的,具体的力学性能数据如表1所列。当

超过正常弹性阶段后, 两个方向的拉伸曲线上都存在一系列的锯齿, 而 $x-z$ 方向锯齿较多且明显(见图 2 中局部放大图), 出现这些锯齿现象是由于镁合金发生孪生方式的塑性变形所致。由于孪生所需的临界切应力远大于滑移, 只有当位错滑移难以继续时, 在高应力集中处诱发孪晶变形, 而孪晶带形核时所需的应力远大于成核后长大所需的应力, 因此孪生变形时会引起载荷的波动。此外, 对拉伸前后 AZ31 镁合金显微组织的对比研究也证实了这一点, 拉伸前并未观察到孪晶组织的存在, 拉伸后有大量的孪晶存在, 说明孪生是镁合金单向载荷下的主要变形方式之一。

表 1 AZ31 镁合金不同方向的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of AZ31 magnesium alloy in various directions

Loading orientation	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Elongation/%
$x-z$	79.6	239.5	21.3
$z-x$	144.6	233.9	17.9

2.2 疲劳裂纹扩展及单峰过载效应

图 3 所示为 AZ31 镁合金不同方向、不同载荷比下疲劳裂纹扩展速率随应力强度因子变化的曲线。由图 3 可看出, 无论是 $z-x$ 方向还是 $x-z$ 方向, 在相同的应力强度因子范围下, 疲劳裂纹扩展速率均随着载荷比 R 的增加而增大; 当应力强度因子范围和载荷比相同时, $z-x$ 方向的疲劳裂纹扩展速率要略高于 $x-z$ 方向的。这主要是由于不同方向材料的力学性能有所差异所致, 虽然两个方向的抗拉强度相当, 但是屈服强度存在明显的差别。疲劳是指材料在交变载荷作用下的累积损伤, 由于 $x-z$ 方向的屈服强度较低、易于变形, 因此其累积损伤较大、导致 $z-x$ 方向的疲劳裂纹扩展速率较快; 反之 $z-x$ 方向累积损伤较小, 因此其 $x-z$ 方向疲劳裂纹扩展速率较慢。定义有效屈服强度 $\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_s + \sigma_b)^{[18]}$, 对疲劳裂纹扩展速率—应力强度因子范围曲线进行归一化处理: 纵坐标疲劳裂纹扩展速率不变、横坐标用 $\Delta K/\sigma_y$ 来代替应力强度因子范围(见图 3(b))。由图 3 可看出, 归一化后, 在相同加载条件下, 不同方向曲线差别不大, 从而进一步说明不同方向疲劳裂纹扩展速率的差异是由于屈服强度不同引起的。当应力强度因子范围相同时, 疲劳裂

纹扩展速率随载荷比的降低而降低。这可能是由于 AZ31 镁合金疲劳裂纹扩展路径相对较为曲折和镁合金在空气中易于被氧化所致, 且随着载荷比的降低, 这些近门槛机制所导致的裂纹闭合效应增加, 降低了疲劳裂纹扩展速率。

单峰过载实验在 $\Delta K=2.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、 $R=0.5$ 、 $\eta=2$ 进行, 虽然在相同 ΔK 时, 两个方向的疲劳裂纹扩展速率有所差异, 但过载对疲劳裂纹扩展的影响效应相似(见图 4)。过载时裂纹会向前扩展一定距离, 且裂纹偏离原来扩展方向。这与面心和体心立方金属材料的过载现象明显不同, 是通过产生新的裂纹表面来松弛集中应力, 而后者是通过塑性变形所产生的裂纹钝化来实现。过载之后再继续疲劳裂纹扩展时, 扩展速率显著降低, 一旦裂纹继续向前扩展, 速率会很快恢复到过载前的水平。

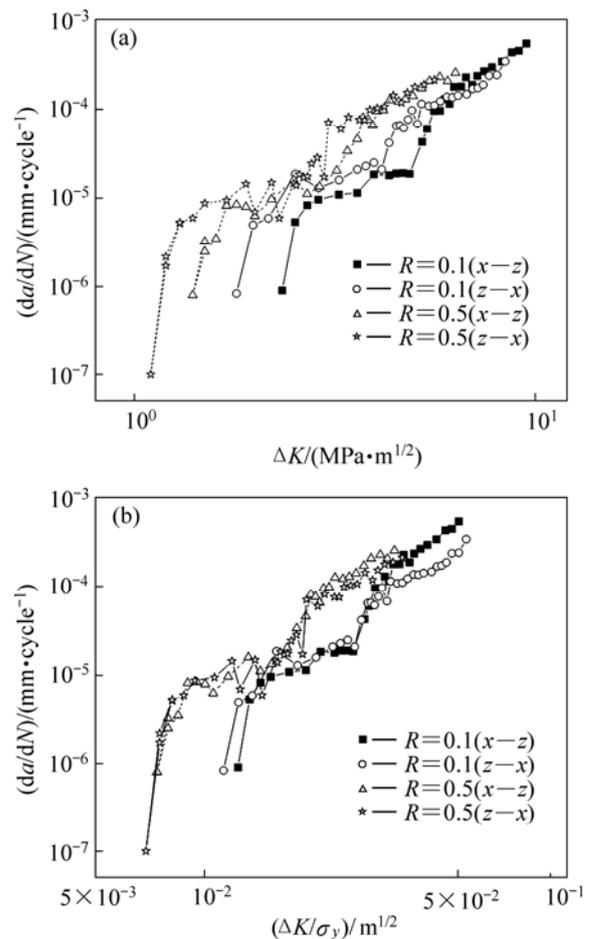


图 3 AZ31 镁合金疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子的关系

Fig.3 Relationships between fatigue crack growth rate and stress intensity factor of AZ31 Mg alloys: (a) Before unification; (b) After unification

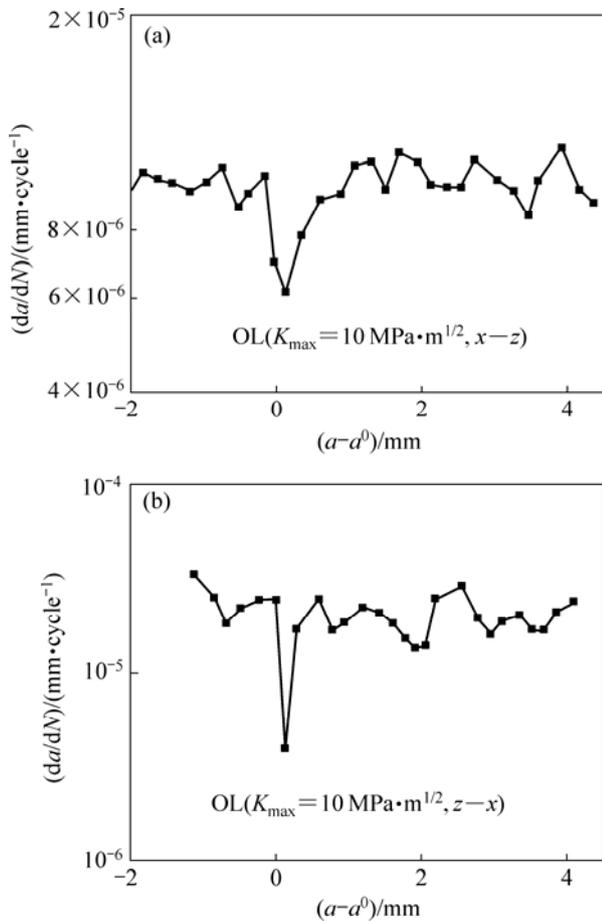


图4 AZ31 镁合金疲劳裂纹扩展中的过载效应

Fig.4 Overload effects on fatigue crack growth of AZ31 Mg alloy: (a) $x-z$ orientation; (b) $z-x$ orientation

2.3 裂纹及断口形貌

用扫描电镜观察了 AZ31 镁合金过载前后的裂纹及断口形貌, 由于两个方向差别不大, 图 5 所示为 AZ31 镁合金 $z-x$ 方向过载前后的疲劳裂纹形貌。图中有些彼此平行颜色较深的条纹, 便于观察过载导致裂纹尖端的变化。过载过程导致裂纹向前扩展了大约

15 μm (原来扩展方向上的投影长度), 裂纹偏离原扩展方向约 45° 。如果定义过载过程裂纹扩展总的长度为 l 、原来扩展方向上的投影长度为 l_1 , 则有 $l = \sqrt{2} l_1$, 本实验过载导致裂纹扩展总的长度大约 21.2 μm 。继续疲劳裂纹扩展实验时, 裂纹会逐渐回到原方向向前扩展(见图 5(c))。图 6 所示为 AZ31 镁合金过载前后的断口形貌。由图 6 可看出, 过载前具有准解理断口特征、呈现河流状花样, 且通过晶界时河流流入相邻晶粒; 过载处不同于其他处疲劳断口形貌, 具有明显的撕裂痕迹, 此处河流出现断流。

疲劳裂纹扩展中的拉伸超载瞬态效应主要可能包括: 裂纹顶端钝化、塑性诱发的裂纹闭合、近门槛机制、残余压应力和裂纹偏折或分叉等。结合裂纹及断口形貌, 对 AZ31 镁合金单峰过载导致疲劳裂纹扩展迟滞现象进行系统分析。首先过载时裂纹向前扩展一定距离, 并偏离原来扩展平面, 此时裂纹扩展速率降至最低, 之后裂纹一旦向前扩展, 速率会很快恢复到过载前的水平, 裂纹顶端并未产生钝化现象; 其次由于镁合金是密排六方结构, 室温下只有 3 个几何滑移系, 其中两个独立的滑移系, 且裂纹尖端三向拉应力状态进一步限制了其塑性变形, 因此塑性诱发的裂纹闭合应不是其主要机制; 第三, 前面分析了裂纹面粗糙等近门槛机制是导致疲劳裂纹速率降低的原因, 虽然拉伸超载会导致裂纹面更加粗糙, 但经过很短距离裂纹扩展速率就恢复到过载前的水平, 而并没有出现长距离裂纹恢复扩展阶段, 说明近门槛机制不是阻滞裂纹继续扩展的主导因素; 第四, 实验中并未观察到裂纹分叉现象。循环拉伸载荷的疲劳裂纹前缘因反向屈服而产生残余压应力, 单峰过载后残余压应力增大阻滞了裂纹的扩展。此外裂纹偏析使得在原来扩展方向上的投影长度缩短。虽然拉伸过载导致裂纹先向前扩展一段距离, 但随后的疲劳裂纹扩展呈现迟滞现象, 即使计算过载点到恢复点之间的平均速率(过载点到

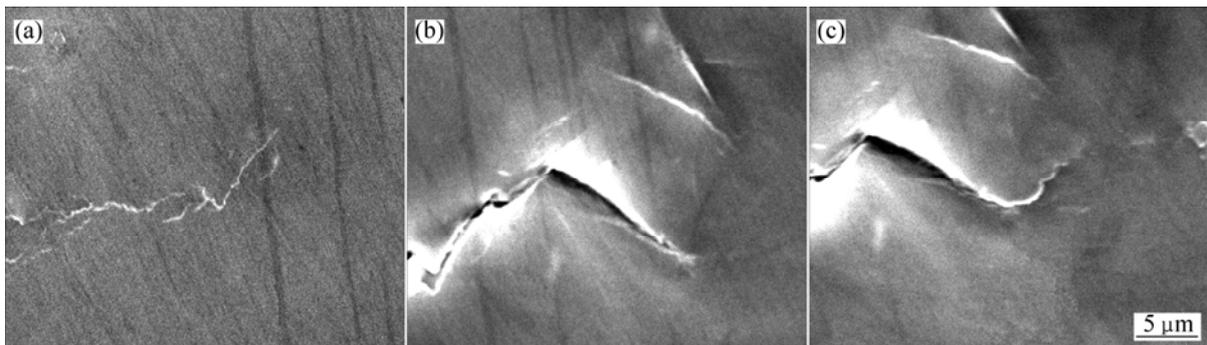


图5 AZ31 镁合金疲劳裂纹形貌

Fig.5 Morphologies of fatigue cracks of AZ31 Mg alloys: (a) Before overload; (b) Overload; (c) After overload

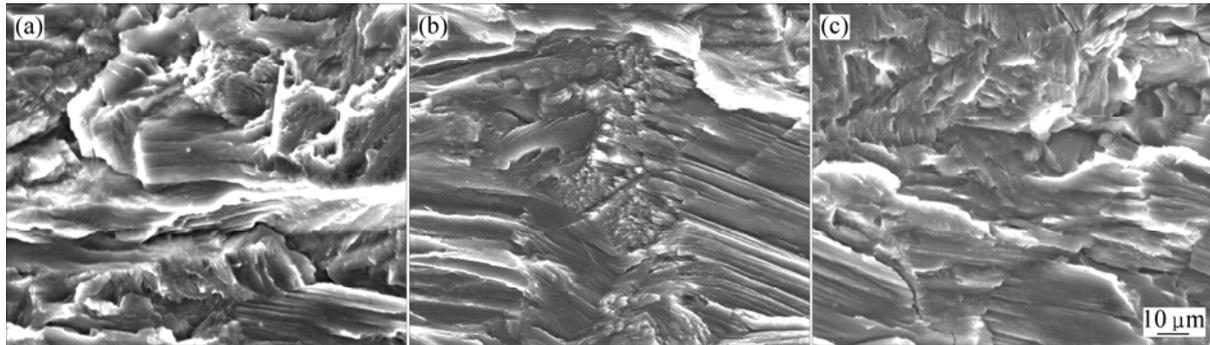


图6 AZ31 镁合金过载前后断口的 SEM 像

Fig.6 SEM images of fracture surfaces of AZ31 Mg alloys: (a) Before overload; (b) Overload; (c) After overload

恢复点的裂纹长度除以总的循环数)较原来速率有明显的降低。这主要是由于过载导致残余压应力增大和裂纹出现偏折所致。从断裂方式上看, 过载处也存在明显的不同, 断口存在撕裂痕迹, 而其他为准解理断口, 这可能是由于在交变载荷和单向载荷作用下材料的变形机制不同所致。虽然总的来看, AZ31 镁合金拉伸过载对疲劳裂纹扩展产生延迟效应, 但由于其塑性变形能力较差, 过载时裂纹并未通过塑性变形产生钝化, 而是继续向前扩展, 这种现象在实际工程应用中可能会造成灾难性后果, 是不容忽视的。

4 结论

1) AZ31 镁合金平行($z-x$)和垂直($x-z$)于长度方向的抗拉强度相差不大, $x-z$ 方向的屈服强度远低于 $z-x$ 方向的, 而 $x-z$ 方向的伸长率略高于 $z-x$ 方向的。两个方向的拉伸曲线上都存在一系列由孪生变形所致的锯齿。

2) 当应力强度因子范围和载荷比相同时, 由于 $z-x$ 方向的屈服强度较高, 因此 $z-x$ 方向的疲劳裂纹扩展速率要略高于 $x-z$ 方向的, 通过有效屈服强度归一化后, 这种差异消失。在相同的应力强度因子范围内, 疲劳裂纹扩展速率随载荷比的降低而降低。

3) 单峰过载时, 裂纹继续向前扩展一段距离, 并偏离原方向一定角度。拉伸过载后, 疲劳裂纹扩展速率明显降低是由于过载导致残余压应力增大和裂纹偏折造成的。

REFERENCES

[1] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光, 李守新, 臧启山, 艾素

华, 于维成, 夏月波, 胡运明, 张广平, 译. 北京: 国防工业出版社, 1999: 157-306.

SURESH S. Fatigue of materials[M]. WANG Zhong-guang, LI Shou-xin, ZANG Qi-shan, AI Su-hua, YU Wei-cheng, XIA Yue-bo, HU Yun-min, ZHANG Guang-ping, transl. Beijing: National Defense Press, 1999: 157-306.

- [2] SHIN C S, HSU S H. On the mechanisms and behavior of overload retardation in AISI 304 stainless steel[J]. Int J Fatigue, 1993, 15(3): 181-192.
- [3] SHIMOJO M, CHUJO M, HIGO Y, NUNOMURA S. Mechanism of the two stage plastic deformation following an overload in fatigue crack growth[J]. Int J Fatigue, 1998, 22(5): 365-371.
- [4] SADANANDA K, VASUDEVAN A K, HOLTZ R L, LEE E U. Analysis of overload effects and related phenomena[J]. Int J Fatigue, 1999, 21(S1): S233-S246.
- [5] BORREGO L P, FERREIRA J M, PINHO DA CRUZ J M, COSTA J M. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure[J]. Eng Fract Mech, 2003, 70(11): 1379-1397.
- [6] CROFT M, ZHONG Z, JISRRAWI N, et al. Strain profiling of fatigue crack overload effects using energy dispersive X-ray diffraction[J]. Int J Fatigue, 2005, 27(10/12): 1408-1419.
- [7] 魏学军, 李劲, 柯伟. A537 钢疲劳裂纹扩展单次拉伸超载效应及裂尖变形, 裂纹闭合行为[J]. 材料研究学报, 1996, 10(6): 608-612.
- WEI Xue-jun, LI Jin, KE Wei. Study of fatigue crack growth retardation, crack tip deformation and crack closure under single overload application for A537 steel[J]. Chin J Mater Res, 1996, 10(6): 608-612.
- [8] 关辉, 李劲, 魏学军, 柯伟. AISI 321 不锈钢单周过载疲劳裂纹扩展的延迟效应[J]. 金属学报, 1999, 35(4): 403-406.
- GUAN Hui, LI Jin, WEI Xue-jun, KE Wei. Effect of single overload on fatigue crack propagation rate for AISI 321 stainless steel under constant ΔK control[J]. Acta Metal Sin, 1999, 35(4): 403-406.

- [9] 关辉, 李劲, 魏学军, 韩恩厚, 柯伟. 环境对 AISI 321 不锈钢疲劳裂纹扩展过载效应的影响[J]. 金属学报, 2003, 39(6): 613-616.
GUAN Hui, LI Jin, WEI Xue-jun, HAN En-hou, KE Wei. Effects of environment on the overload behavior of fatigue crack propagation for AISI 321 stainless steel[J]. Acta Metal Sin, 2003, 39(6): 613-616.
- [10] 聂德福, 马海涛, 赵杰. X70 钢室温蠕变及对疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(S1): 91-94.
NIE De-fu, MA Hai-tao, ZHAO Jie. Room temperature creep and its influence on fatigue crack growth in a X70 steel[J]. Chin J Mater Res, 2007, 21(S1): 91-94.
- [11] 刘黎明, 王继峰, 宋刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1523-1526.
LIU Li-ming, WANG Ji-feng, SONG Gang. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy[J]. Chin J Lasers, 2004, 31(12): 1523-1526.
- [12] 张兆栋, 刘黎明, 沈勇, 王来. 镁合金的活性电弧焊接[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 912-916.
ZHANG Zhao-dong, LIU Li-ming, SHEN Yong, WANG Lai. Activating flux for arc welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 912-916.
- [13] 陈振华, 严红革, 陈吉华, 全亚杰, 王慧敏, 陈鼎. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 202-323.
CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Ji-hua, QUAN Ya-jie, WANG Hui-min, CHEN Ding. Magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 202-323.
- [14] 张津, 章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 39-175.
ZHANG Jin, ZHANG Zong-he, et al. Magnesium alloys and their application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 39-175.
- [15] TOKAJI K, KAMAKURA M, ISHIZUMI Y, HASEGAWA N. Fatigue behavior and fracture mechanism of a rolled AZ31[J]. Int J Fatigue, 2004, 26(11): 1217-1224.
- [16] NAN Z Y, ISHIHARA S, GOSHINA T, NAKANISHI R. Scanning probe microscope observations of fatigue process in magnesium alloy AZ31 near the fatigue limit[J]. Scr Mater, 2004, 50(4): 429-434.
- [17] MARA M, GHECTOR L, VERMA R, TONG W. Microstructural effects of AZ31 magnesium alloy on its tensile deformation and failure behavior[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 418(1/2): 341-356.
- [18] GB2038—91. 金属材料延性断裂韧度 J_{IC} 试验方法[S].
GB2038—91. Metallic materials-standard test method for J_{IC} , a measure of ductile fracture toughness[S].

(编辑 李艳红)