

AZ31 镁合金裂纹扩展各向异性声发射特征分析

苏应虎^{1,2}, 王小娇^{1,2}, 李程浩^{1,2}, 张红霞^{1,2}, 闫志峰^{1,2}, 李永莲¹

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 先进镁基材料山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 利用声发射技术对 AZ31 镁合金轧制方向和横向的疲劳裂纹扩展行为进行了研究。结果表明, 镁合金疲劳裂纹扩展过程中产生的声信号撞击数与循环载荷的关系, 以及撞击数上升率和应力强度因子幅的关系 $dC/dN-\Delta K$, 分别与常规疲劳裂纹扩展试验结果相一致, 裂纹失稳扩展临界应力强度因子幅与常规试验结果的误差分别为 2.86%(裂纹沿轧制方向)和 3.00%(裂纹沿横向); 载荷一定时, 裂纹沿横向扩展总是比沿着轧制方向扩展更慢一些, 进入失稳扩展阶段更迟。微观组织显示, 裂纹沿横向扩展边缘处的孪晶明显增加, 断口处也表现出更明显的塑性, 这对裂纹的扩展产生了阻碍, 即材料在横向的抗裂性能要优于轧制方向, 同时证明了利用声发射监测裂纹扩展行为的可靠性。

关键词: AZ31 镁合金; 各向异性; 声发射; 疲劳裂纹扩展

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-177-06

镁是地壳中排位第 6 的富有元素, 其蕴藏量为 2.77%, 同时也是海水中的第 3 富有元素, 约占海水质量的 0.13%, 这为镁合金的大批量的开发研究提供了条件。研究证实, 镁合金具有密度低、比强度和比刚度, 加工性能较好且易于回收利用等优点, 目前已经在海、陆、空等交通运输领域得到广泛应用。但其化学性质活泼、熔点低、热膨胀系数和导热系数较大且易氧化等^[1]特点, 对镁合金的力学性能造成了较大的影响。对镁合金进行轧制等机械加工方法可以提高其性能。在实际应用中, 金属结构经常遇到复杂动载环境下的交变载荷, 使得疲劳断裂就成为构件失效的一种主要形式, 因此材料疲劳裂纹扩展行为受到了科研工作者的关注和研究^[2]。

声发射是材料内部因变形、断裂而引起的弹性波释放的现象^[3], 作为监测金属内部变化的一种手段, 其采集的声音信号与材料内部的变形机理密切相关, 不受外界温度、环境等的影响(噪声可以通过滤波去除), 这就使得声发射监测技术除了具有高灵敏性、实时监测性等众所周知的优点外, 更重要的是可以多参分析、缺陷定位、适用于恶劣环境下的检测等^[3]。随着其监测精度的逐步提高, 声发射在不同材料中的传输特性得到了研究^[4], 其应用开始于地震监测^[5], 石头、水泥等材料的断裂方面^[6-8], 到最近几年应用于复合材料^[9], 金属方面的拉伸、变形及断裂方面的监测^[10-15], 声发射在工业生产方面已经得到了广泛的应用。

本实验主要是研究 AZ31 镁合金试样在动载环境下, 裂纹沿着轧制方向(RD)和横向(TD)的扩展行为, 通过实时监测疲劳试验过程中试样内部声发射信号发生的变化, 并结合金相, 断口形貌图等表征方法来分析 2 个方向的开裂行为及机理。

1 实验

使用 Mg-Al-Zn 系的 AZ31 镁合金, 其化学成分(质量分数)为: Al 2.8%, Zn 1.1%, Mn 0.4%, 力学性能如表 1 所示。试样的裂纹扩展的方向分别沿着 RD 和 TD, 采用 10 mm 厚的 CT 试样进行疲劳裂纹扩展试验, 尺寸为 85 mm×82 mm×10 mm, 在裂纹扩展路径上均匀画 30 条细线, 细线之间的间隔是 1 mm, 以方便对裂纹长度的记录, 如图 1 所示。

疲劳裂纹扩展试验在 SDS100 低频拉压电子伺服疲劳试验机上进行。试验载荷为正弦波形, 应力比 $R=0.1$, 加载频率为 20 Hz。根据 GBT6389-2000 裂纹扩展标准的规定, 试验次数应 ≥ 3 以提高试验准确性,

表 1 AZ31 镁合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy

Yield stress/MPa	Tensile stress/MPa	Elongation/%
132	240	10

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51505322, 51175364)

作者简介: 苏应虎, 女, 1991 年生, 硕士, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: 18734621529@163.com

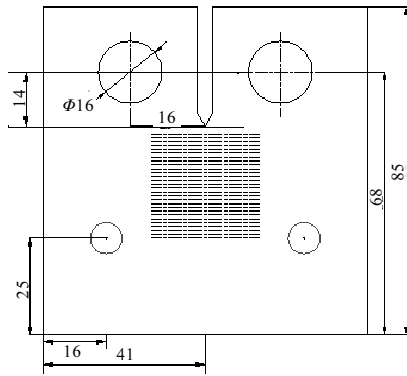


图 1 疲劳裂纹扩展试样图

Fig.1 Schematic illustration of fatigue crack propagation samples

通过多次试验最终确定本试验选用 2.4, 2.6, 2.8 kN 作为循环载荷, 通过疲劳数据分别对 2 个方向的试样做出疲劳曲线, 对镁合金试样在不同方向上的疲劳裂纹扩展速率做分析, 最终预测其疲劳寿命。

声发射信号的采集是在 DS5 声发射采集仪上进行的。声发射采集仪和疲劳试验机同时工作, 选用 1、5 通道采集, 放大器调节器调至 40 倍, 选用阈值触发方式, 阈值数值设置为 35 dB。采集到的波形参数需要进行滤波, 经查阅相关文献, 得知金属试样变形及开裂的声发射频率范围是 100~400 kHz^[16], 选用此带通值进行滤波去除噪音, 再将滤波后的波形文件回放, 得到相对应的声音信号参数, 包括幅值、能量值、撞击数、频率等参数数据。通过处理这些数据, 得到相应的曲线图, 与疲劳裂纹扩展试验对比分析, 达到对疲劳裂纹扩展的表征研究。

2 结果和分析

2.1 常规疲劳裂纹扩展试验

疲劳裂纹扩展过程可以分为裂纹萌生阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹失稳扩展阶段, 稳定扩展阶段中裂纹扩展速率和应力强度因子幅符合线性关系式:

$$\log(da/dN) = \log B + A \log(\Delta K), da/dN = B(\Delta K)^A \quad (1)$$

其中, a 表示裂纹长度, N 表示载荷循环次数, ΔK 表示应力强度因子幅, A 和 B 是系数。

图 2 是镁合金 2 个方向的疲劳裂纹扩展试验的参数曲线, 黑色实体线条表示的是载荷沿着 RD 方向, 红色空心线是指载荷沿着 TD 方向。图 2a 是不同载荷下的 $a-N$ 曲线, 可以得出在不同方向上都呈现出一致的规律, 裂纹扩展速率随所加载荷的增加而增加, RD 方向裂纹扩展速度均略大于 TD 方向。图 2b 是 $da/dN-\Delta K$ 曲线, 根据曲线斜率的变化可以将其分为 3

段, 分别对应于裂纹扩展的 3 个阶段。其中中间的一段为裂纹稳定扩展阶段, 可以拟合为一条直线, 其线性表达式以及裂纹失稳扩展临界 ΔK 值如表 2。图中表明, 在应力强度因子幅 ΔK 一定时, RD 方向的裂纹扩展速率值高于 TD 方向, 与图 2a 中结果一致。但 2 个方向上的曲线得到的拐点(即失稳扩展临界值)有差别, RD 方向上的临界值为 $5.25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 而 TD 方向的临界值为 $5.67 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 说明了 RD 方向上抗裂性能低于 TD 方向的抗裂性能。应力强度因子幅 ΔK 是试验系数, 与材料所加载荷及裂纹扩展的长度有关系。

2.2 声发射信号监测结果及分析

以 $F=2.8 \text{ kN}$ 为例, 图 3 是整个裂纹扩展过程中的实时声波图形, 图中显示随着循环次数的累积, 声波幅值逐渐增加, 有效声波出现的次数也逐渐密集, 直到最后的裂纹失稳阶段, 声波迅速密集同时幅值迅速增大。原因是镁合金在受到疲劳载荷时, 外部施加的

表 2 RD 和 TD 方向上裂纹稳定扩展阶段试验参数

Table 2 Experiment parameters in TD and RD direction at the stable cracking stage

$\log(da/dN)=\log B+A\log(\Delta K)$	A	B	Coupling coefficient
RD	-3.87	1.119	0.93
TD	-3.42	0.807	0.91

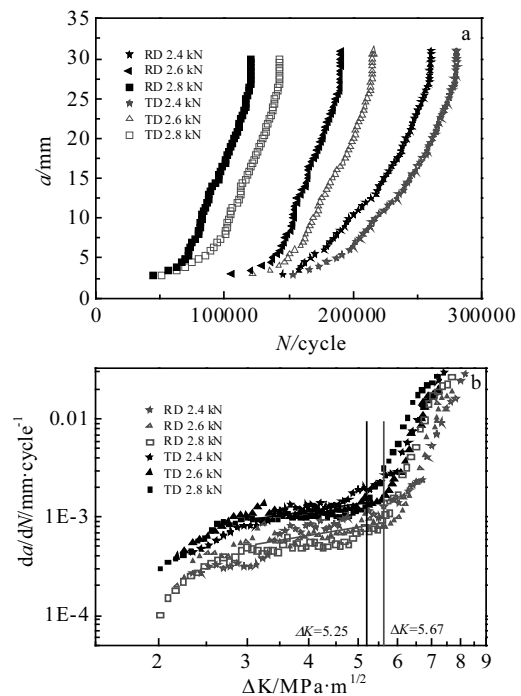


图 2 镁合金疲劳裂纹扩展曲线

Fig.2 Fatigue crack propagation curves for AZ31 magnesium alloy: (a) $a-N$ curve and (b) $da/dN-\Delta K$ curve

机械功会转化为其内部的能量,从而导致试件内能升高;当内能高于试样所能承受而开始变形的时候,其内部的能量会向周围释放,其中一种能量形式就是声波,变形越严重,释放的声波也越大。回放波形,可以得到一系列参数,通过对这些参数的提取和处理,可以对疲劳裂纹扩展机理做详细的分析。

图 4 为能量和时间的函数关系图,可以看出在 8700 s 之前,信号的能量低于 100 mV·ms,且处于稳定状态;之后,能量开始逐步稳定上升;当时间为 10 500 s 时,能量迅速增大,达到 800 mV·ms,经历了短暂的几分钟后,试样断裂。根据载荷频率为 20 Hz,结合图 2 可以计算出 10 500 s 时的应力强度因子幅是 5.2 MPa·m^{1/2},与常规试验的临界应力强度因子幅数值相对应,即可以通过能量的变化来区分裂纹的不同扩展阶段,进而对其扩展行为做分析和评定。

图 5 为声发射信号曲线,从图 5a 可以看出,声发射信号的累计撞击数与载荷循环次数的关系曲线 C-N 曲线的趋势与图 2 中 a-N 曲线类似,即开始呈现出较平缓的上升趋势,一旦达到了某一特定的数值,撞击数开始迅速上升,近似线性上升,直至达到最大值,

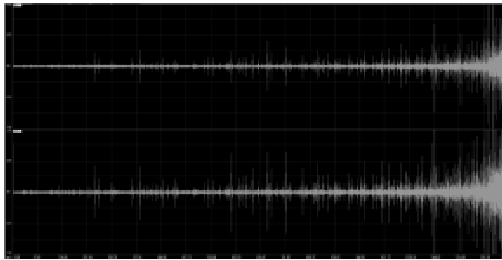


图 3 裂纹扩展中 F=2.8 kN 的声发射实时波形图
Fig.3 Acoustic emission signal image of the AZ31B magnesium alloy when F=2.8 kN

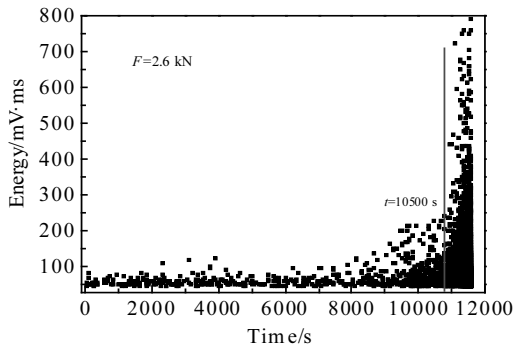


图 4 裂纹扩展能量随时间变化图
Fig.4 Energy evolution with the time of the magnesium alloy under the load of 2.6 kN

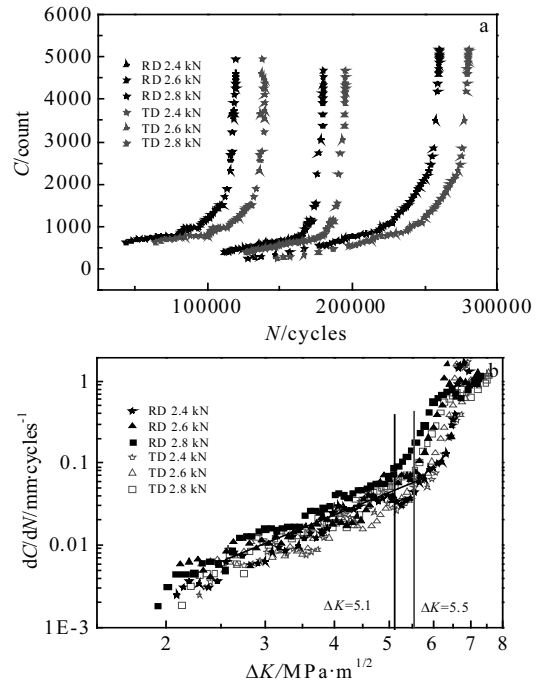


图 5 声发射信号曲线
Fig.5 Acoustic emission curves for the AZ31B magnesium alloy: (a) C-N curve and (b) dC/dN-ΔK curve

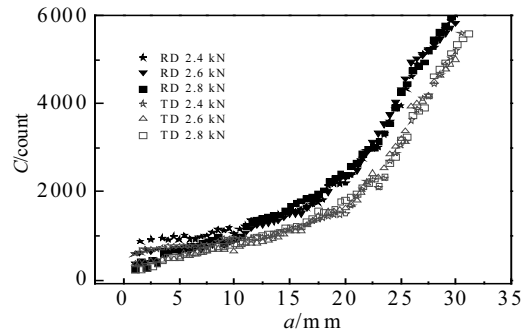


图 6 声发射撞击数和裂纹长度的关系曲线
Fig.6 Hit counts evolution during the crack propagation of magnesium alloy under different loads

意味着试样的断裂。图 5b 是 dC/dN-ΔK 曲线,反映的是单位循环载荷下的撞击数与应力强度因子幅的函数关系,从图中可以看出 2 个方向的曲线在整个扩展过程中几乎重合,按照斜率不同,可以分为不同的两段,第 1 段中撞击数变化率与应力强度因子幅呈线性关系,拟合关系式为^[16]:

$$\log(dC / dN) = \log B + A \log(\Delta K) \tag{2}$$

其与第 2 段的拐点值却不同，分别为 5.1 和 5.5 MPa·m^{1/2}，即 TD 方向的裂纹更快进入失稳扩展区，与常规疲劳试验所得的结果（5.25 和 5.67 MPa·m^{1/2}）相近，误差分别为 2.86%(RD)，3.00%(TD)，在有效范围之内。声发射信号反映的是材料内部的能量释放情况，可以准确、直观地反映裂纹扩展情况，又因为其采集声音信号的时间精度为 μs，与常规实验中观察试样表面裂纹长度的方法比起来，结果更加精确。RD 方向上的撞击数与 TD 方向的数值几乎重合，且略高于 TD 方向，证明了声发射信号的大小取决于试样内部的变形机理，不同轧制方向的裂纹在相同扩展阶段，其机理是相同的，同时也在一定程度上受变形程度和开裂速度的影响。在试验允许的范围之内，证明了声发射技术监测和评定裂纹扩展行为是一种可靠的无损检测方法。

从图 6 声发射撞击数和裂纹长度的关系曲线中可以看出，撞击数和应力强度因子幅呈幂函数关系^[17]：

$$C = DK^m \tag{3}$$

又因为：

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \tag{4}$$

将公式(4)代入公式(3)中得到：

$$C = A(\sigma\sqrt{\pi a})^m = A\pi^{\frac{m}{2}}\sigma^m a^{\frac{m}{2}} \tag{5}$$

作为一种近似估算，可以用屈服强度 σ_{ys} 来代替应力 σ ，则公式(5)可以表示为：

$$C = A\pi^{\frac{m}{2}}\sigma_{ys}^m a^{\frac{m}{2}} = A'a^{\frac{m}{2}} \tag{6}$$

从图 6 可以证明，不同载荷下 2 个方向的镁合金试样的裂纹扩展过程中的撞击数-循环次数曲线： $C-N$ 曲线符合幂函数关系，其具体表达式及参数如表 3 所示。

随着裂纹长度的增加，RD 和 TD 方向上的声音撞击数由部分重合逐渐过渡到分离，最终形成了独立的 2 条曲线，如图 5 所示。撞击数随裂纹的增加呈现为 2 个上升阶段：第 1 阶段撞击数随时间缓慢增加，并且 2 个方向上无明显差别，刚开始大部分重叠在一起，紧接着进入裂纹稳定扩展阶段，此时，RD 方向的撞击数开始比 TD 方向加快，并且逐渐分成了 2 条曲线；进入裂纹失稳扩展阶段，如图中第 2 阶段所示，撞击

表 3 RD 和 TD 方向 dC/dN-ΔK 曲线拟合参数

Table 3 Experiment parameters of dC/dN-ΔK curve in RD and TD direction

$C=A+B\alpha^d$	A	B	d	Coupling coefficient
RD	696.78	0.52	2.72	0.98
TD	460.56	0.35	3.27	0.95

数迅速上升，且 RD 方向与 TD 方向的区别更加明显，直至最后断裂。曲线整体的变化趋势与 $a-N$ 曲线大致吻合，同时这也证实了声发射监测裂纹扩展的可靠性。

2.3 镁合金的微观组织

图 7 是镁合金 XRD 分析结果，结果显示镁合金中并不含有第二相，这一结果与图 8 所示一致。结合图 5b 可知：声发射信号在裂纹扩展刚开始比较低，且 2 个方向上的信号有大部分重合。

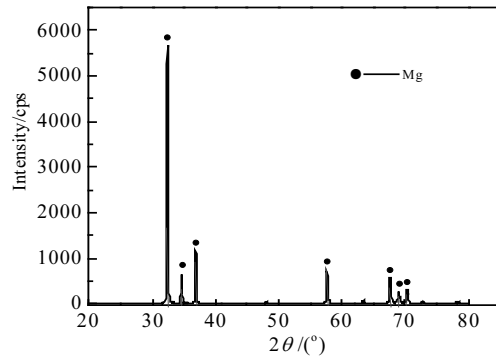


图 7 镁合金 XRD 图谱

Fig.7 XRD pattern of magnesium alloy

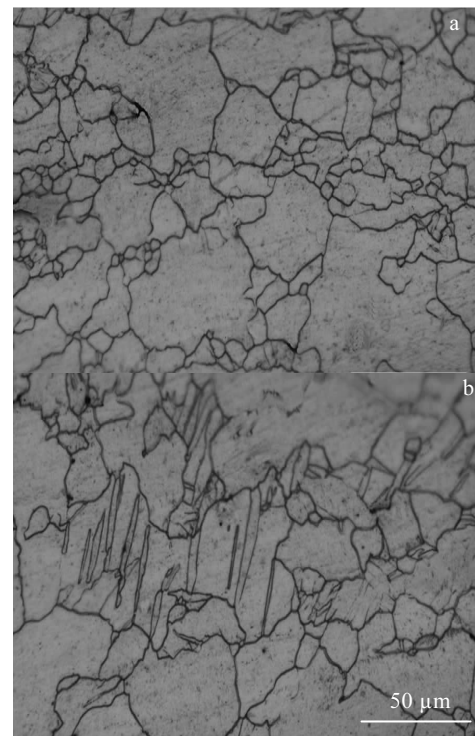


图 8 镁合金裂纹边缘处的微观组织

Fig.8 Microstructures of the edge of crack: (a) along RD direction and (b) along TD direction

这是由于预制的 2 mm 裂纹相当于一个开口缺陷, 缺陷尖端存在较大的应力集中, 所以当再次施加载荷时, 裂纹尖端首先会产生弹塑性变形, 产生较为微弱的声发射信号, 这时不同方向上变形差别微小, 故声信号相重合。当循环载荷继续累积, 裂纹开始扩展, 由于镁合金属于密排六方晶体结构, 室温下只有基面 $\{0001\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 及锥面 $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 2 个独立的滑移系开动, 不可能有协调 c 轴方向拉伸与压缩应变的变形, 只有少量的锥面滑移系开动^[18]。同时, 裂纹在扩展过程中不受第二相的阻止, 裂纹可以缓慢扩展, 所以撞击数开始缓慢上升。当应力强度因子幅值 ΔK 随着裂纹的持续扩展而增加到一定值时, 裂纹进入稳定扩展阶段, 此时裂纹尖端处应力集中也增大, 这一应力就会诱发机械孪晶, 因为诱发机械孪晶所需的应力小于激活非基面滑移系所需的应力^[18-20], 如图 8 所示。这样孪生和滑移相互竞争, 同时又相互促进, 使得试验材料通过发生一定的塑性变形来降低应力, 从而使得裂纹扩展速度达到一个稳定阶段。由于此时材料内部的机械孪晶被激活, 并伴随有滑移, 可以产生较多的声发射信号, 撞击数上升幅度加大, 如图 5b 所示。当 ΔK 值达到临界值时, 试件损伤严重, 塑性变形已不足以承受裂纹尖端塑性区的应力集中, 致使

裂纹进入失稳扩展阶段, 撞击数以更大幅度急剧增加, 直至最终试件失效断裂。结合图 7 与图 8 可以看出, 在裂纹沿着 RD 和 TD 方向扩展的过程中, 裂纹边缘附近产生了不同程度的孪晶。孪晶作为塑性变形的一种产物, 可以在一定程度上起到阻裂的作用, 而 RD 方向的试样上孪晶量明显少于 TD 方向, 这就是载荷相同条件下, 裂纹沿着 RD 方向扩展要比沿 TD 方向扩展更快的原因。

图 9 是 ED 和 TD 2 个方向裂纹扩展后的断口相貌, 取 ΔK 分别为 4.8 和 5.8 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 点处的断口进行扫描, 可以看到在 $\Delta K=4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 2 个方向均属于解理断裂, 有明显的撕裂棱出现; 当 $\Delta K=5.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 断口形貌出现了明显的转变, 表现为准解理断裂, 验证了在此期间裂纹扩展由稳定阶段进入了失稳扩展阶段。在 2 个方向上的断口也表现出了一定的差异, RD 方向的断口处变形略小于 TD 方向, 这是因为镁合金轧制后形成了织构, 这种织构是由基面 $\{0001\}$ 的滑移和锥面 $\{10\bar{1}2\}$ 的拉伸孪晶产生的^[21], 这样就使得 TD 方向(平行于织构方向)上的抗变形能力表现出一定的优越性。这一原理在图 9b 和 9d 中尤其明显: 图 9d 中材料表现出更好的塑性, 这也是导致 TD 方向裂纹扩展较为缓慢的一个原因。

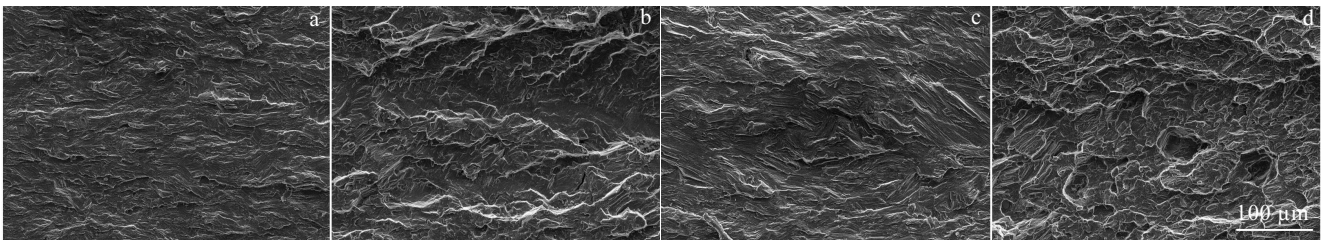


图 9 镁合金裂纹稳定扩展阶段和失稳扩展阶段断口形貌

Fig.9 SEM morphologies at the stable cracking stage and the unstable cracking stage: (a, b) RD direction and (c, d) TD direction

3 结论

1) 镁合金疲劳裂纹扩展过程中产生的声信号撞击数与循环载荷的关系 $C-N$, 以及撞击数上升率和应力强度因子幅的关系 $dC/dN-\Delta K$, 分别与常规试验结果相一致, 误差分别为: 2.86%(RD), 3.00%(TD), 证实了声发射技术可以用来表征疲劳裂纹扩展行为。

2) 声发射曲线 $C-a$ 曲线呈现出撞击数与裂纹长度是幂函数关系式, 即可以根据采集到的声音撞击数计算出裂纹长度, 进而得到对应的应力强度因子幅值, 判断试样的剩余使用寿命。

3) 裂纹沿 RD 方向扩展总是比 TD 方向的先进入失稳扩展阶段, 可知材料 TD 方向的抗裂性能要优于

RD 方向。

4) 与 RD 方向相比较, 裂纹沿 TD 方向扩展时, 表现出更大的塑性变形, 产生了较多的孪晶, 从而在一定程度上阻止了裂纹的扩展, 进一步证实声发射结果的可靠性。

参考文献 References

- [1] Ding Wenjiang(丁文江). *Science and Technology of Magnesium Alloy*(镁合金科学与技术)[M]. Beijing: Science Press, 2007
- [2] Cui Xiaoming(崔晓明), Bai Pucun(白朴存), Liu Fei(刘飞) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 728
- [3] Li Mengyuan(李孟源). *Detection and Signal Process of*

- Acoustic Emission*(声发射检测及信号处理)[M]. Beijing: Science Press, 2010
- [4] Xiang Jianjun(向建军), He Zhongyi(贺中意), Wang Zhe(王哲) *et al. Henan Science and Technology*(河南科技)[J], 2014(16): 71
- [5] Karcili M, Alver N, Ohtsu M. *Materials and Structures*[J], 2016, 49(6): 2171
- [6] Carpinteri A, Lacidogna G, Accornero F *et al. Cement & Concrete Composites*[J], 2013, 44: 9
- [7] Fan X, Hu S, Lu J *et al. Construction & Building Materials*[J], 2016, 114: 66
- [8] Geng J, Sun Q, Zhang W *et al. Applied Thermal Engineering*[J], 2016, 106: 1200
- [9] Munoz V, Valès B, Perrin M *et al. Composites Part B Engineering*[J], 2015, 85: 68
- [10] Chang Hong. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(6): 1840
- [11] Ennaceur C, Laksimi A, Hervé C *et al. International Journal of Pressure Vessels & Piping*[J], 2006, 83(3): 197
- [12] Horváth K, Drozdenko D, Máthis K *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 680: 623
- [13] Oberwinkler Bernd. *Materials Science & Engineering A*[J], 2011, 528(18): 5983
- [14] Han Z, Luo H, Sun C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 597(8): 270
- [15] Vinogradov A, Orlov D, Danyuk A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 621(2): 243
- [16] Editorial Committee of National Defense Science and Technology Industry Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification Training Materials(《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编). *Detection of the Acoustic Emission*(声发射检测) [M]. Beijing: China Machine Press, 2005
- [17] Han Z, Luo H, Zhang Y *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 559: 534
- [18] Fu Xuesong(付雪松), Chen Guoqing(陈国清), Wang Zhongqi(王中奇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(8): 1473
- [19] Sun Yin(孙颖), Han Jing(韩晶), Zheng Liuwei(郑留伟). *Light Alloy Processing Technology*(轻合金加工技术)[J], 2017, 45(3): 26
- [20] Yan Yaqiong(闫亚琼), Luo Jinru(罗晋如), Zhang Jishan(张济山) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2017, 53(1): 107
- [21] Shi Baodong(石宝东), Peng Yan(彭艳), Han Yu(韩宇) *et al. Journal of Yanshan University*(燕山大学学报)[J], 2015(3): 221

Anisotropic Fatigue Cracking Behavior of AZ31 Mg Alloy Based on Acoustic Emission

Su Yinghu^{1,2}, Wang Xiaojiao^{1,2}, Li Chenghao^{1,2}, Zhang Hongxia^{1,2}, Yan Zhifeng^{1,2}, Li Yonglian¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-Based Materials, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Fatigue crack propagation experiment of AZ31 magnesium alloy in different directions were conducted accompanied by acoustic emission monitoring, and the results presented similarities with the conventional results. Acoustic emission hit counts have a liner relationship with the stress intensity factor range at the stable cracking stage, and the turning point of $dC/dN-\Delta K$ curves have errors of 2.86% (along the rolling direction) and 3.00% (vertical to the rolling direction) with that of $da/dN-\Delta K$. The crack propagates along the rolling direction slower than along another direction, and the reason could be as follows: there are obvious quasi-cleavage fracture and more twins when the crack propagates vertical to the rolling direction, which could stop cracking to some extent. So the crack resistance of rolling direction is worse than that of another direction; meanwhile it is demonstrated that the acoustic emission technique is a practical method to study the fracture behavior.

Key words: AZ31; rolling direction; acoustic emission; fatigue crack propagation

Corresponding author: Yan Zhifeng, Ph. D., College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: yanzhifeng@tyut.edu.cn