

文章编号: 1001-4888(2002)03-0345-09

LY12 铝疲劳裂纹在冲击载荷下的演化研究^{*}

席 军¹, 段祝平¹, 马 维¹, 杨治星¹, 吴 穷¹, 何思源²

(1. 中科院力学所 LNM, 北京 100080; 2 中国工商银行 重庆分行科技处, 重庆 630060)

摘要: 对 LY12 铝合金在低周疲劳条件下的裂纹情况和随后进行的动态拉伸条件下裂纹的发展给予了观察和统计分析. 发现裂纹的累积数密度分布在损伤演化过程中保持指数形式, 用 NAG 模型对实验结果进行分析, 得出该材料裂纹演化发展方程的各种参数

关键词: 疲劳裂纹; 动态拉伸; NAG 模型; 损伤演化

中图分类号: O 346 5 **文献标识码:** A

1 引言

疲劳和动态冲击是工程实践中导致结构和构件失效的两种主要形式, 人们在这两方面作了大量的研究. 但是以往的工作往往将两种破坏形式分开考虑, 形成了疲劳和冲击两大相对独立的领域. 而实际工程中, 受疲劳和冲击交替作用的情况很多. 如大炮支架, 在长时间的运输过程中经受疲劳作用后, 发射炮弹又受到强烈的冲击, 还有飞机降落时起落架的载荷情况等等. 如何对这类构件寿命进行评估是一个新的课题.

从损伤的角度来看, 不论是疲劳还是动态破坏, 都是一个微裂纹(或空洞)成核, 演化和失效破坏的连续过程, 国内外学者的研究^[1, 2, 5, 6, 7]表明: 材料损伤演化过程是全体裂纹共同作用的结果, 有必要对裂纹群体的行为进行研究, 并考虑损伤的随机性. 本文在前人的基础上, 从细观分析入手, 将疲劳和冲击对材料的破坏过程作为一个整体进行研究, 以 NAG 模型为基础, 采用统计的方法, 选用一种在航空、车船、桥梁等领域广泛应用的铝合金- LY12, 在对其疲劳裂纹进行统计分析基础上, 研究了不同冲击拉伸载荷下疲劳裂纹的演化规律, 实验结果基本与 NAG^[7]模型符合, 并用该模型对实验结果进行了分析.

* 收稿日期: 2001-05-23; 修订日期: 2002-06-18

作者简介: 席军(1970-), 男, 中科院力学所博士研究生. 从事材料在热力联合作用下破坏机理的实验和理论分析研究.

2 疲劳裂纹的生成及统计分析

2.1 疲劳实验

我们首先进行疲劳实验,以观察材料在低周疲劳不同阶段疲劳裂纹的出现和分布情况。本文选用一批试样,由于实验材料为LY12,经固溶处理+自然时效处理。试件设计,参照国家标准:《金属轴向疲劳试验方法》GB 3075-82和《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》GB 6399-86,同时考虑到Hopkinson拉杆上完成动态加载的需要,试件设计为直径12mm的圆柱,中间工作段用线切割切成厚1mm的平板。如图1为观察试件疲劳裂纹萌生情况,实验之前,将试件工作段表面进行金相打磨抛光。这种情况下实验的工作量比较大,我们最初准备了20个试件,而经过疲劳和拉伸实验之后可以得到可靠数据的有用试件只剩下6个。

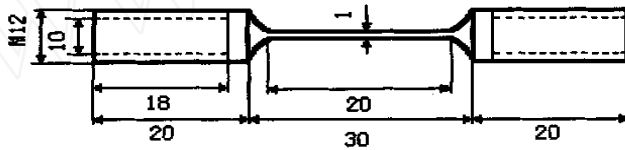


图1 试件示意图

疲劳实验在MTS实验机进行,为拉-拉大载荷低周循环加载,加载强度略大于材料屈服极限 σ_s ,最大与最小应力比为2%,加载频率为20Hz,疲劳周次分三个等级,第一等级为试件1,疲劳周次为3000周次级,第二等级为试件2、3、4,疲劳周次在6500周次左右,第三等级为试件5、6,疲劳周次在10000周次左右。详见表1。

表1 试件疲劳试验情况

试件编号	应力水平 (MPa)	应力比 (%)	频率 (Hz)	疲劳周次 (周)
1	480	2	20	3057
2				6021
3				6597
4				6607
5				9905
6				10047

2.2 分析与统计

由于试件厚度比较薄,试件表面出现的裂纹基本上反映了材料的损伤情况。所以我们只需要对表面裂纹进行分析统计。将疲劳加载后的试件表面在电子扫描镜SEM下观测,如图3。鉴于本实验所采用的LY12材料特点以及显微相片的分辨率,本文将大于 $5\mu\text{m}$ 以上的裂纹定为裂纹成核。由于裂纹尺寸很小,不可能将试件整个表面都完全统计,而且裂纹的出现具有相对集中的区域。所以,我们选取试件两面的过渡部分和中间部分等具有代表性的8个区域的显微相片进行统计分析。

得到 6 个试件表面裂纹累积数密度分布如图 5 其中横坐标 R 为微裂纹长度, 纵坐标 N 为单位面积上长度大于 R 的微裂纹数 从图中可以了解到: 微裂纹累积数密度分布基本上呈指数曲线形式, 可以用型如 $N(R) \sim N_0 \exp(-R/R_1)$ 的函数表示 从统计结果看(见表 2), 在疲劳周次较低的时候, 损伤主要表现为数量较多的短裂纹, 随着疲劳周次的增加, 短裂纹生长变长, 部分裂纹合并, 表现出裂纹数量下降, 平均裂纹长度增加的趋势

表 2 试件表面裂纹统计结果

试件编号	1	2	3	4	5	6
疲劳周次	3057	6021	6597	6607	9985	10047
裂纹平均长度(μm)	11.7	17.1	20.83	24.63	44.1	39
裂纹数	51	45	45	61	17	9

3 动态拉伸实验

下面我们将对已有疲劳损伤的试件在冲击拉伸情况下损伤的发展演变进行实验研究 为此将前面已做过疲劳实验的表面抛光的试件, 在 Hopkinson 杆上做动态拉伸实验

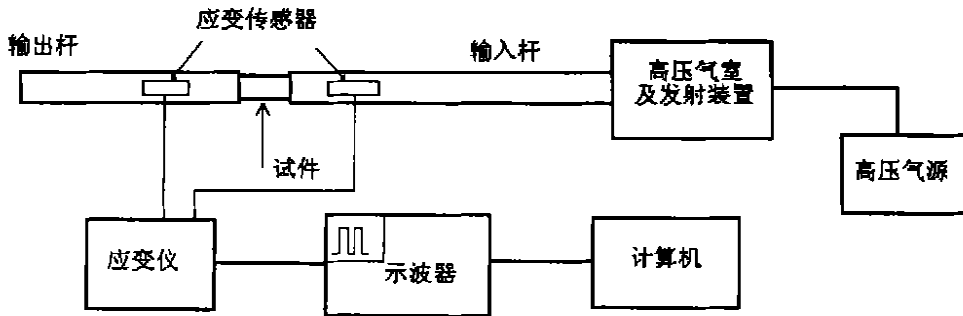


图 2 Hopkinson 拉杆装置

实验装置如图 2 应变片在导入杆距杆端 40cm, 在导出杆上距杆端 16cm, 应变片(灵敏度系数为 2.02, 阻值为 120 Ω)由 914 胶对称粘于杆上, 固化 24 小时, 然后将两应变片串联以消除弯曲对测量的影响 应变信号由超动态应变仪和 Philip 3365A 存储示波器测量及记录, 再通过配套计算机系统将信号数字化并采集到计算机中进行处理 导杆直径 20mm, 导杆的密度为 2.8g/cm³, 弹性模量 71GPa, 由此可知杆中波速为 5036m/s 试件与杆以螺纹形式连接 根据应力均匀化分析, 波在试件内经 2~ 3 次反射后, 试件内应力和应变分布基本均匀 本实验试件有效长度为 20mm, 子弹长 100mm, 子弹产生的波长为 200mm, 应力波在试件上反射 9 次, 故试件内应力应变分布基本满足均匀

通过控制子弹在膛中的不同位置, 以及气压的大小, 以决定加载强度的不同, 子弹长度不变, 故加载时间不变, $t = 40\mu\text{s}$

做过疲劳并进行过表面观察的试件共 6 件 以不同的加载强度进行拉伸, 加载时间不变 然后在电子扫描镜 SEM 下观察表面并拍照, 如图 4

4 实验结果及分析

4.1 动态分析

试件在杆上近似受平面应力作用 在此实验条件下,用受测应变波算试件的应力应变关系已不再准确,故我们只计算试件两端的受力状态^[3].

在对数据的处理中,我们用入射波与反射波计算了输入杆对试件的加载,用透射波计算了输出杆对试件的加载,采用如下公式^[4].

$$\sigma_1 = \rho_0 c_0^2 \{ \epsilon + \epsilon_r \}$$

$$\sigma_2 = \rho_0 c_0^2 \epsilon_t$$

从计算结果可以看出,试件两端的载荷基本一致,具体拉伸载荷见表 3

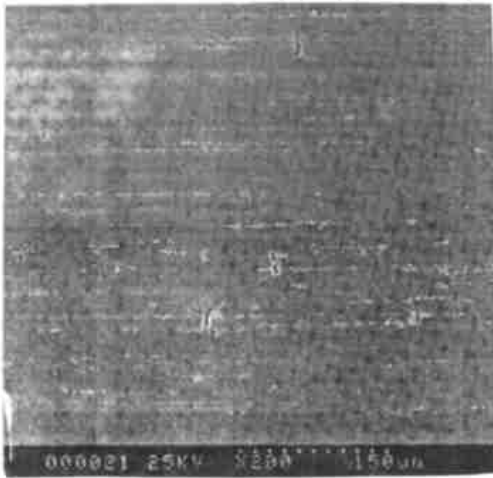


图 3 拉伸前的表面裂纹

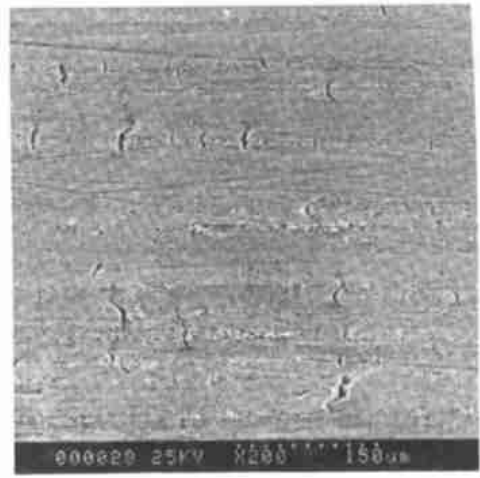


图 4 拉伸后的表面裂纹

4.2 裂纹的统计分析

最后再对试件进行微观观察测量 观察经动态拉伸后试件表面可以知道,表面微裂纹数明显增加,说明微观损伤在拉伸载荷下有显著发展 经过统计发现,微裂纹的累积数密度分布仍然呈指数函数形式,见图 5 用函数 $N_g(R)$ 表示单位面积上长度大于 R 的所有微裂纹数,裂纹分布函数可表达为如下形式:

$$N_g(R) = N_0 \exp(-R/R_1) \quad (1)$$

其中 N_0 是单位面积微裂纹总数, R_1 是裂纹分布参数,也就是微裂纹的数学期望值 裂纹在动态拉伸载荷下的演化过程始终保持分布函数 $N_g(R)$ 为指数形式 从以上的实验观察可以了解到,疲劳裂纹和动态损伤裂纹的萌生,发展和演化表现出相同的形式,这样我们可以考虑寻找一种统一的形式描述两个破坏过程,找出决定微损伤演化的材料参数 Seam an 等人^[5]在研究了铝、铜、铁、岩石等材料的动态破坏基础上提出了NAG 计算模型,该模型较好地描述了微损伤的萌生发展,与我们实验的结果也比较符合 这里我们就以 Seam an 等人的NAG 模型对实验结果进行分析,研究在已有疲劳损伤条件下LY12 经过动态拉伸后损伤的发展状况

(1) 成核

根据NAG 模型,动态加载条件下成核机制是应力/温度驱动成核模式,即破坏以原子键

的断裂为其主要特征 应力/温度驱动成核模式的描述使用Bultzman 统计学,把成核看作是键的破坏愈合过程演化到断键的速率大于愈合键的速率的结果

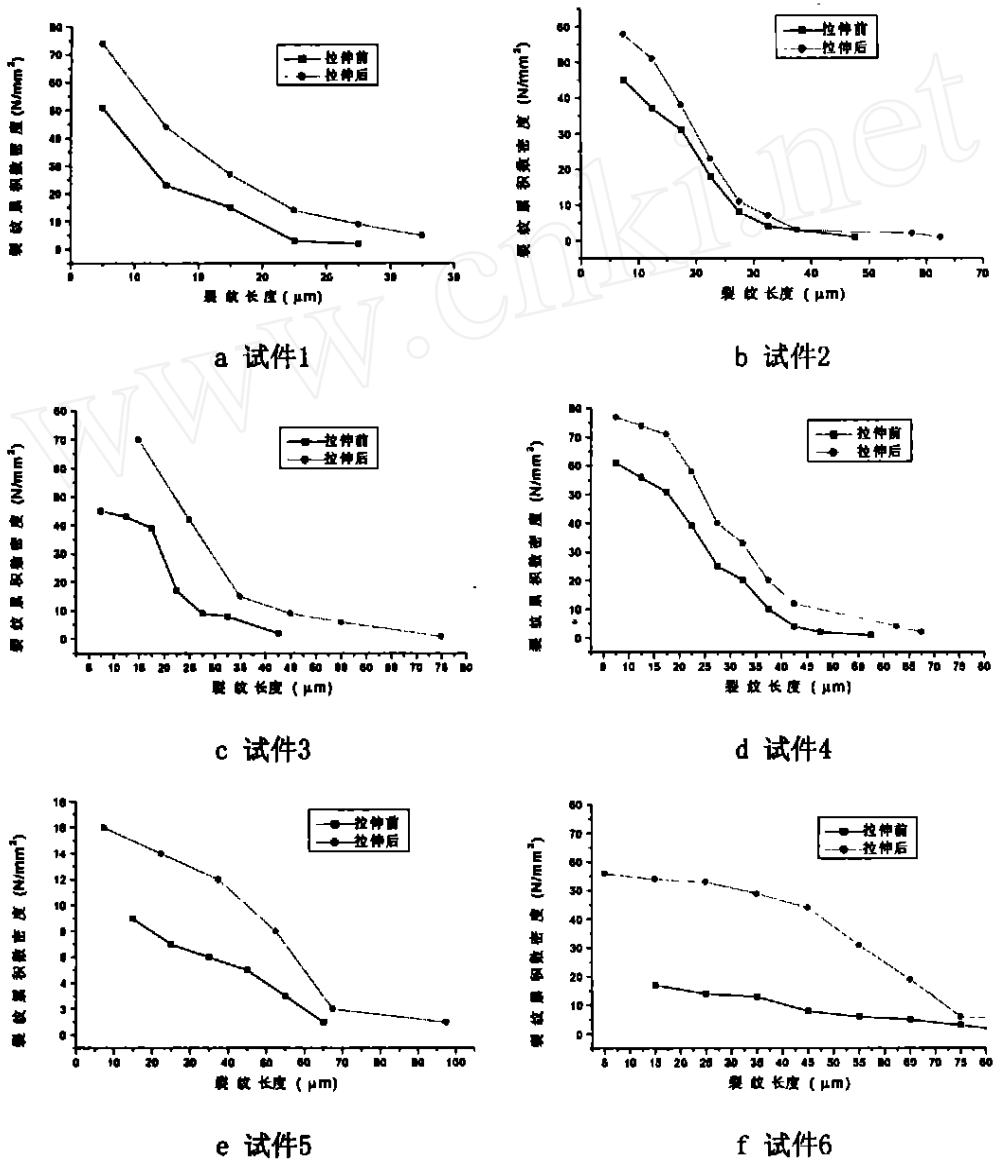


图 5

由此可推导出成核表达式:

$$N^{\circ} = \begin{cases} N^{\circ}_0 \exp[(P_s - P_n)/P_1] & P_s > P_n \\ 0 & P_s \leq P_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, N°_0 和 P_1 为材料常数, P_s 为固体材料的拉伸应力, P_n 为成核应力阈值 从本实验所得结果如表 3

表3 拉伸试验结果(加载时间 $t = 40\mu\text{s}$)

试件	拉伸前裂纹数密度 ($/\text{mm}^2$)	拉伸后裂纹数密度 ($/\text{mm}^2$)	裂纹增加数 ($/\text{mm}^2$)	拉伸载荷 (MPa)
5	17	54	37	896
3	45	70	25	764
1	51	75	24	754
4	61	75	14	653
2	45	58	13	620
6	9	16	7	496

成核率与载荷存在一种幂指关系,我们假定在动态拉伸条件下LY12的成核阈值与疲劳成核的阈值一致,故 $P_n = \sigma_{0.2} = 453\text{MPa}$ 我们将试件受到的载荷减去 P_n 作为横坐标,将裂纹数的增长作为纵坐标作图并线性拟合如图6

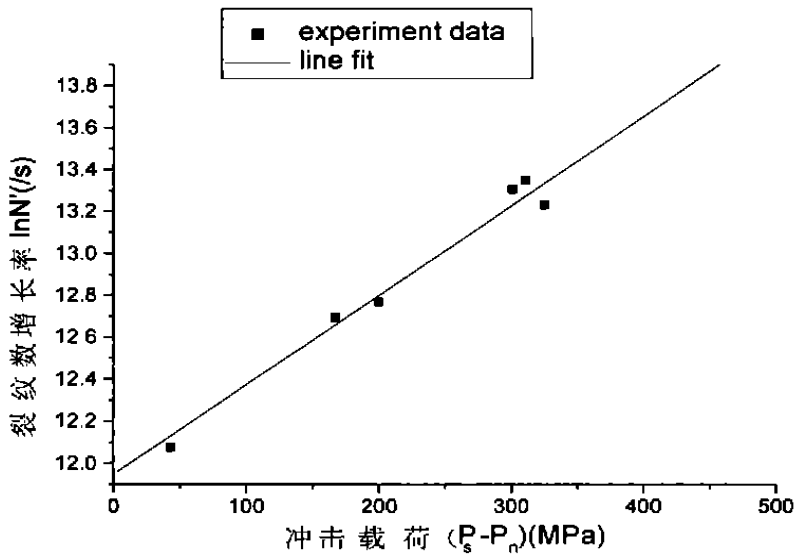


图6 裂纹数增长与载荷关系

拟合曲线公式为:

$$\ln \dot{N} = 11.95 + 4.27 \times 10^{-3} (P_s - P_n)$$

从(2)式的形式可得:

$$\ln \dot{N} = \ln \dot{N}_0 + \frac{1}{P_1} (P_s - P_n)$$

进而可以得材料参数:

$$\dot{N}_0 = e^{11.95} (\text{s}^{-1})$$

$$P_1 = 234.19 (\text{MPa})$$

(2) 微裂纹生长

微裂纹数密度分布在动态冲击载荷前后基本保持幂函数形式,这说明微裂纹扩展也是按幂函数方式,那么微裂纹特征尺寸(长度的数学期望)的演化就可用来代表大量微裂纹的演化,所以,微裂纹长度的数学期望为其特征尺寸。

Seaman 等人^[2]通过对铜、铝等的研究发现,裂纹生长线性地依赖载荷水平和裂纹的原尺寸,故生长率为:

$$\dot{R} = [(P_s - P_{g0})/4\eta]R \tag{3}$$

P_s 为载荷强度, P_{g0} 为生长载荷阈值, $\eta = \sigma_y/(3\sigma)$, σ_y 为基体屈服载荷, σ 为与粘性系数有关材料参数

在 Δt 时间内,裂纹生长由上述方程积分得:

$$R = R_0 \exp\left\{\frac{3\sigma(P_s - P_{g0})}{4\sigma_y} \Delta t\right\} \tag{4}$$

R_0 为开始时裂纹长度

既然微裂纹都是以指数形式生长,其生长速率由方程(3)控制,那么,微裂纹的特征尺寸也应满足生长方程(4):

$$R_1 = R_{10} \exp\left\{\frac{3\sigma(P_s - P_{g0})}{4\sigma_y} \Delta t\right\}$$

对试件在冲击后表面微裂纹分布进行统计,各试件的裂纹长度都有了许多变化,见表 4

表 4 试件冲击前后表面微裂纹分布情况对比

试件	冲击前			冲击后			冲击载荷 (MPa)	裂纹增长率 (m/s)	$\frac{\dot{R}}{R}$ (/s)
	裂纹数 (/mm ²)	裂纹数密度-一阶矩 (μm)	裂纹长度数学期望 (μm)	裂纹数 (/mm ²)	裂纹数密度-一阶矩 (μm)	裂纹长度数学期望 (μm)			
5	17	750	44.1	43	2326	54.1	778	0.25	5680
3	45	937.35	20.83	70	1790	25.57	764	0.1185	5690
1	51	597.5	11.7	74	1050	14.2	754	0.0625	5340
4	61	1502.5	24.63	77	2207.5	28.67	653	0.101	4100
2	45	767.5	17.1	58	1145	19.7	620	0.065	3800
6	9	350	39	6	690	43.1	496	0.1025	2630

将裂纹特征尺寸变化对载荷的演化在坐标上表示,可以看出, \dot{R}/R 与 P_s 成线性关系,如图 7,拟合曲线为:

$$\frac{\dot{R}}{R} = 10.799P_s - 2802.45$$

σ_y 为基体屈服载荷,取 453MPa,由以上方程可得

$$\frac{\dot{R}}{R} = \frac{3\sigma}{4\sigma_y}P_s - \frac{3\sigma}{4\sigma_y}P_{g0}$$

进而可以得材料参数:

$$\Theta = 6.52 \times 10^3 (s^{-1})$$

$$P_{g0} = 259.51 (MPa)$$

裂纹数密度的演化, 由两方面贡献, 即裂纹的成核与裂纹的生长 我们既已得到这两方面的控制方程, 那么LY12 疲劳裂纹在冲击载荷下的演化形式就可以具体地确定下来

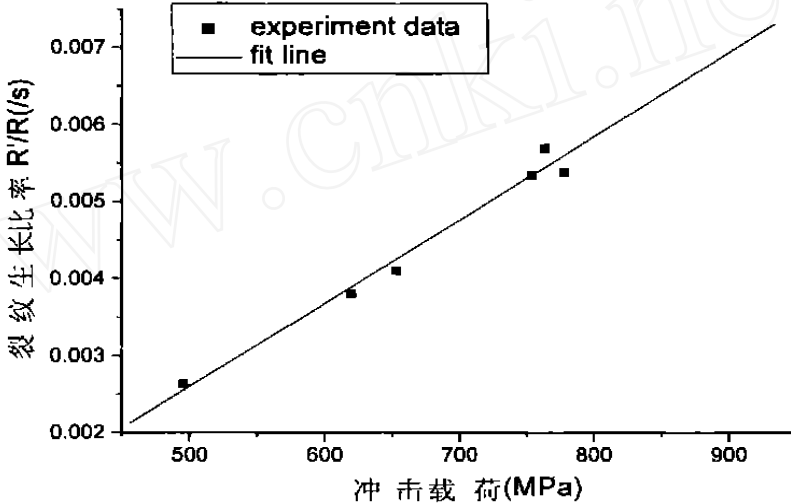


图 7 裂纹特征尺寸与载荷的关系

5 结论

本文用已有疲劳损伤的试件, 进行相同冲击时间, 不同冲击强度的拉伸实验, 对冲击后试件的表面裂纹进行统计, 用NAG 模型对裂纹的演化进行了描述, 并拟合出LY12 的材料参数结论如下:

(1) 用累积数密度分布来表征微裂纹, 疲劳后的试件微裂纹与冲击后的试件微裂纹, 其累积数密度分布基本满足指数函数:

$$N_g(R) = N_0 \exp(-R/R_1)$$

(2) 冲击拉伸下, 微裂纹的成核率与载荷强度满足指数关系:

$$\dot{N} = \dot{N}_0 \exp[(P_s - P_n)/P_1]$$

通过对实验数据的拟合, 得出参数的具体形式为:

$$\dot{N}_0 = e^{11.95} (s^{-1})$$

$$P_1 = 234.19 (MPa)$$

(3) 微裂纹的生长率与载荷水平和裂纹的原尺寸成线性关系:

$$\frac{\dot{R}}{R} = 3\Theta (P_s - P_{g0}) / (4\sigma)$$

对实验数据的拟合得到参数形式为:

$$\Theta = 6.52 \times 10^3 (s^{-1})$$

$$P_{g0} = 259.39(\text{MPa})$$

这样就得到了LY12 铝材料裂纹演化的总的规律,从而对该材料的损伤演化过程可以定量地描述

参考文献

- [1] Jean Lemaitre, Jacques Dufailly. Damage Measurements [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28 (516): 643- 661.
- [2] Lynn Seaman, Donald R Curran and Shockey D A. Computational models for ductile and brittle fracture [J]. A. Physics, 1976, 47: 4814- 4826
- [3] 段祝平等. 高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究 [J]. 力学进展, 1980, 10(1).
- [4] 王礼立编著. 应力波基础 [M]. 国防工业出版社, 1985
- [5] Curran D R, Seaman L. Dynamic Failure of Solids [J]. Physics Reports, 1987, 147: 253
- [6] 白以龙, 柯孚久, 夏蒙禁. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述 [J]. 力学学报, 1991, 123: 290-298
- [7] 高庆, 黄正中, 戴振羽等. 低周疲劳随机损伤过程的有限元模拟 [J]. 固体力学学报, 1997, 8(1): 58-64

The Evolution of Fatigue Cracks in Aluminum Alloy LY-12 under Shock Loading

XI Jun¹, DUAN Zhu-ping¹, MA Wei¹, YANG Zhi-xing¹, WU Qiong¹, HE Si-yuan²

(1. LNM Lab, Institute of Mechanics, Chinese Academic of Science, Beijing 100080;

2. The Department of Science and Technology, Chongqing Industrial and Commercial Bank, Chongqing 630060)

Abstract: The cracks in aluminum alloy LY-12 specimen under low cycling fatigue are observed and their development caused by following dynamic tensile loading are examined experimentally and analyzed statistically. It is found that the cumulative size distribution of microcracks fits an exponential law during the development of damages. The results of experiments are analyzed by means of NAG model. All parameters in the governing equation are obtained for the material.

Key words: fatigue crack; dynamic tensile; NAG model; damage development