

# 制绳钢丝疲劳损伤过程声发射研究

邵永波 裴 珍 于大安 王 师  
(东北大学)

**摘 要** 研究了制绳钢丝在高周疲劳过程中的声发射(AE)行为. 结果表明, AE过程明显分为三个阶段, 分别对应钢丝塑性变形、疲劳裂纹成核和裂纹扩展. 裂纹孕育及成核期约占整个疲劳寿命的70%, 裂纹扩展占30%.

**关键词** 制绳钢丝 疲劳 声发射

**分类号** TB302

**文章编号** 1005-3093(2000)02-0163-04

## ACOUSTIC EMISSION DURING FATIGUE DAMAGE OF STEEL WIRE

SHAO Yongbo\* PEI Zhen YU Daan WANG Shi

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006)

**ABSTRACT** Acoustic emission (AE) behaviors of steel wire have been studied firstly during high-cycle fatigue damage. Results showed that AE process consists of three distinct stages, corresponding to plastic deformation, fatigue crack nucleation and crack propagation, respectively. It can be seen from this that the period of fatigue crack nucleation and initiation was approximately 70% of entire fatigue life, and that of crack propagation was only 30%.

**KEY WORDS** steel wire, fatigue, acoustic emission

钢丝在使用中承受交变载荷, 其疲劳行为是预测其使用寿命最有价值的指标之一. 钢丝具有诸如直径小、经多次拉拔高度变形、比面积大、显微组织呈纤维状等特性, 加之对其缺少实时动态监测的手段, 故对它的疲劳行为缺乏系统深入的研究. 本文采用声发射技术研究制绳钢丝的高周疲劳损伤过程.

### 1 实 验 方 法

试样为直径 2.3mm, 长度 220mm 的制绳钢丝, 其化学成分及机械性能列于表 1. 强化试样两端, 以避免在试样根部出现断裂. 为对比研究, 将试样分为三类: (1) 无缺口钢丝; (2) 中部开缺口钢丝; (3) 中部开缺口 + 预制疲劳裂纹钢丝 (为消除线切割产生的硬化层对钢丝疲劳性

1999年7月16日收到初稿; 1999年12月22日收到修改稿.

本文联系人: 邵永波, 副教授, 沈阳市 110006, 东北大学信息科学与工程学院

\* To whom correspondence should be addressed

能的影响, 在线切割槽(深 0.1mm)的基础上再预开更尖锐的疲劳裂纹, 长度为 0.2mm). 声发射实验是在拉-拉循环加载条件下进行的, 频率为 10Hz, 最大应力为 988MPa, 应力比  $R=0.1$ . 声发射装置为 LOCAN AT 系统, 采用中心频率为 150kHz 的谐振式换能器和频带为 100~300kHz 的前置放大器. 系统总增益为 90dB, 门槛电平为 27dB. 两只换能器间距 120mm, 采用线定位技术进行测试.

表 1 钢丝的化学成分和机械性能

Table 1 Chemical composition and mechanical property of steel wire

Chemical composition/%					Mechanical property			
C	Si	Mn	P	S	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	$\sigma_{0.2}$ /MPa
0.720	0.261	0.482	0.013	0.012	1873	1.9	50	1656

$\sigma_b$ -tensile strength;  $\delta$ %-percentage elongation;  $\psi$ %-percentage reduction of area;  $\sigma_{0.2}$ -yield strength

## 2 结果与讨论

由图 1a 可见, 对于无缺口试样, 整个 AE 过程分为三个阶段: 初始阶段 0~28800 周循环

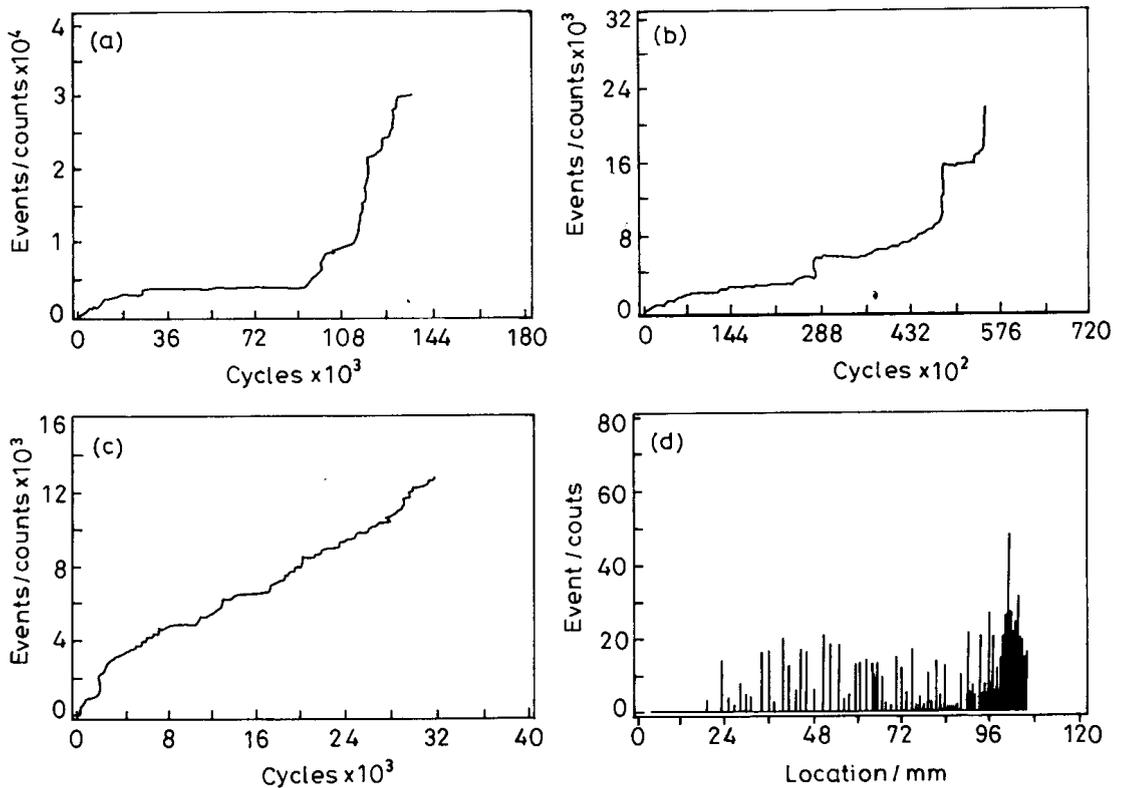


图 1 钢丝疲劳损伤过程中的 AE 行为

Fig.1 AE behaviors during fatigue damage of steel wires. (a) AE events accumulation vs cycles for wire; (b) AE events accumulation vs cycles for wire with notch; (c) AE events accumulation vs cycles for wire with notch and pre-crack; (d) AE events vs location of defect activities in wire

内, AE 具有一定程度的活性, 事件率由大变小; 在第二阶段 28800~90000 周内, AE 趋于平静, 累积事件增幅很小; 进入第三阶段 90000~126000 周之后, AE 活性大幅增加. 图 1d 为 AE 信号定位图, 可以看出 AE 事件在试样长度方向上不同部位处产生, 但以 101mm 断裂处最为密集, 显示出裂纹扩展并断于此处的趋势过程.

显微观察表明, 钢丝表面有大量沟槽<sup>[1]</sup>. 在疲劳初始阶段, 这些局部缺陷导致钢丝表面应力集中<sup>[2]</sup>, 引起局部塑性变形从而产生 AE 事件. 由于缺陷沿长度方向分布, 相应的 AE 事件也由长度方向上的不同部位处产生, 如图 1d 所示. 钢丝为加工硬化材料, 疲劳初期出现循环软化现象. 循环软化与位错运动相互作用从而产生更多的 AE 事件<sup>[3]</sup>, 这导致 AE 过程初始阶段的高事件率. 在交变载荷作用下, 钢丝表面局部塑性变形多为表面晶粒处的不均匀滑移. 随着疲劳损伤的发展, 循环滑移的总趋势是速度逐渐减慢, 相应的 AE 事件率也逐渐减小, 由此形成 AE 过程的第一阶段, 对应着钢丝初始塑性变形过程.

裂纹孕育期间, AE 活性较低, 这是位错活动与消失之间出现动态平衡的结果<sup>[4]</sup>. 这时大量局部塑性变形已先后进入停止状态. 在钢丝表面最大切应力处, 择优滑移系经过相当长的一段时间后逐渐演变成为疲劳裂纹的核心. 在这一过程中, 循环滑移由表面晶粒处开始, 逐渐发展, 穿过晶界直到一至两个晶粒处<sup>[5]</sup>. 由于这种疲劳裂纹成核速度很慢, 由此产生的 AE 其活性也较低, 这样就出现了 AE 过程的第二阶段. 实质上 AE 过程的头两个阶段是缺陷由多处发展最后形成一处主裂纹的过程, 其时间约占整个疲劳寿命的 70%, 如图 1a 所示. 当上述裂纹继续发展时即进入疲劳裂纹扩展阶段. 这时 AE 事件率明显增高并持续到钢丝完全失效. 这一阶段的 AE 事件除来自裂纹扩展外, 还来自 (1) 裂纹面闭合时的研磨过程; (2) 裂纹尖端塑性区变形; (3) 夹杂物的脱粘和断裂; (4) 纵向二次裂纹的开裂过程. 这形成了 AE 过程第三阶段的高事件率现象, 与裂纹孕育期的 AE 行为有着十分明显的差别.

图 1(b) 表明, 与未开缺口试样相比, 有缺口试样的 AE 过程几乎没有平静阶段, 在整个疲劳过程中 AE 事件在不断增加, 若忽略最初阶段, 事件率仍随疲劳的进展而加大. 其寿命比无缺口试样亦大为缩短. 在试样断口处可明显见到多点疲劳源区, 表明局部应力集中导致多点裂纹成核, 并使成核时间缩短, 在此过程中 AE 具有一定程度的活性. 如果将上述过程同无缺口试样 AE 过程的第三阶段相比较, 并考虑到多点疲劳源成核占用一定时间, 发现二者很相似, 这说明无缺口试样 AE 过程的第三阶段即为疲劳裂纹扩展过程. 第 (3) 类试样的实验曲线如图 1c 所示. 可以看出其 AE 发展趋势近似于直线, 说明疲劳裂纹近似于等速地扩展. 在整个疲劳损伤以至断裂过程中 AE 总计数比前两个情况少, 寿命最短. 由于预制裂纹, 疲劳损伤直接由裂纹扩展区处开始, 所得 AE 曲线反应的是裂纹扩展过程. 与无缺口试样 AE 过程的第三阶段相比较, 前者时间短, 这是由于其裂纹扩展区比后者小的缘故, 除此之外, 二者很相似. 这再次说明无缺口试样 AE 过程的第三阶段即为疲劳裂纹扩展过程. 另外, 这一时期的 AE 活性比前两个过程大得多, 也表明 AE 来源于裂纹扩展.

### 3 结 语

疲劳裂纹起源于钢丝表面的缺陷, 表面缺口导致裂纹孕育及成核期缩短, 从而使整个疲劳寿命缩短. 钢丝疲劳损伤不同阶段的 AE 特征可表征钢丝疲劳损伤的动态过程.

## 参 考 文 献

- 1 U.D'Heane, I.Lefever, I.Verpoest, Wire Industry, **54**(639), 179(1987)
- 2 K.K.Schrems, J.Tes.Evalu., **22**, 5(1994)
- 3 D.Fang, A.Berkovits, J.Eng.Mater.Technol., **117**, 200(1995)
- 4 E.F.Morris, Met.Trans. A, **11A**, 365(1980)
- 5 M.A.Daeubler, A.W.Thompson, I.M.Bernstein, Metall.Trans., **21A**, 925(1990)