

桥梁拉索损伤声发射监测及其临界损伤判断

李冬生¹ 欧进萍^{1,2}

(1 大连理工大学土木水利学院 大连 116024 2 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090)

摘要:通过拉伸试验,得到了钢绞线整个损伤过程的声发射特征参数,测试结果表明:采用计数、能量、持续时间、幅值和时间的相关点图来综合表征损伤,不但可以跟踪全过程损伤,而且还可以准确判断出断丝信号和非断丝信号以及断丝位置,并发现钢绞线在屈服变形之前,声发射特征参数并不明显,屈服阶段之后,声发射的特征参数逐渐增大,在临近断裂时,声发射特征参数迅速增大。最后采用声发射特征参数时间序列分形理论研究了钢绞线的损伤演化规律,在加载初中期,分形维数变化不大,当钢绞线裂纹进入快速扩展阶段,分形维数出现“最大-最小”变化模式,运用此模式可为钢绞线临界损伤破坏提供一个新的判据。

关键词:桥梁拉索损伤 声发射 特征参数 分形理论

1 引言

在各种类型的桥梁当中,拱桥占据着重要的地位。根据资料表明,中国公路桥梁当中,70%是拱桥。在中、上承式拱桥结构体系中,作为受力元件之一的吊杆,扮演着很重要的角色。尤其近年来,发生多起拱桥吊杆断裂事故,造成了巨大的经济损失和社会影响,因此,如何寻找一种有效、快速实时监测吊杆状态的方法显得十分重要。吊杆是由多根钢绞线组成,研究吊杆的损伤程度,归结于研究钢绞线的损伤状况。以往对钢绞线的研究多侧重于钢丝表面质量对其疲劳性能的影响,以及进行常规的力学性能,钢丝的疲劳裂纹生成及扩展的动态过程则所知甚少,这一方面是由于疲劳损伤过程难于观测所制,另一方面是由于缺少动态监测手段,钢丝直径小,圆柱形外貌,其表面粗糙,加之疲劳生成区域不固定,这些都导致常规的裂纹观测方法对其不适。而声发射技术跟其他无损检测技术相比,它是一种被动检测技术,声发射来自缺陷变化,一旦有缺陷变化,声发射技术就能获取这一信息,此外,利用声发射技术监测钢绞线的损伤,传感器的布设非常简单,固定在钢绞线的表面即可,不需要检测装置与钢绞线之间的相对移动。根据Casey的试验表明,断丝产生的声发射信号传递29.5米距离后其幅值衰减并不严重,因此我们可以布设很

少的声发射传感器就能全面监测整根钢绞线的损伤。基于声发射技术的优点,我们决定采用此技术来监测钢绞线整个拉伸过程中损伤状况。

为了进一步研究声发射特征参数究竟到达一个什么样的程度钢绞线就会破坏,本文利用钢绞线拉伸试验得到的声发射特征参数时间序列,运用分形理论,对钢绞线破坏过程、声发射特征参数的时间变化特征进行研究,寻找钢绞线破坏过程声发射参数的时序变化特性,为钢绞线临界损伤提供一个新的判据,以提高钢绞线失效破坏监测预报的准确性。

2 试验方案与加载装置

本试验在柳州OVM公司进行,用 $\phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线作为试件,钢绞线抗拉强度为1860MPa,弹性模量为 $1.95 \times 10^5\text{MPa}$,试件长度为1100mm,将其穿过钢绞线专用张拉台座和千斤顶,装上锚具,再用夹片夹紧钢绞线,进行张拉,试验装置如图1:



图1 钢绞线拉伸试验声发射测试装置

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖二等奖(原载Proc. of SPIE Vol. 6934)

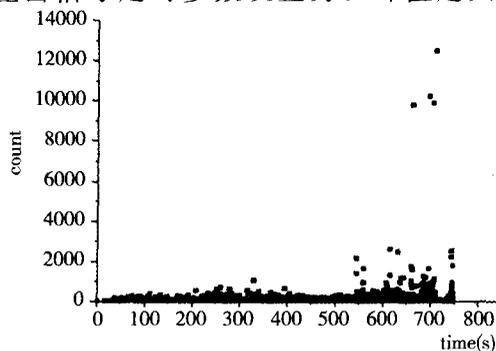
声发射传感器布设在两端的锚具上,采用线定位技术来确定断丝的位置。在实验前,先进行标定试验,在试样中间位置处进行断铅试验,测量两个声发射传感器的灵敏系数,使它们接收到的声发射信号幅值差不超过 $\pm 4\text{dB}$,若相差较大,可通过检查探头的耦合情况和微调增益来达到灵敏度的一致。保证他们有相同的灵敏度后,再测量钢绞线的声速。具体的声发射参数设置为:传感器的中心频率为 150KHz ,前置放大器的增益为 40dB ,滤波频率为 $100\text{KHz} \sim 600\text{KHz}$,系统阈值先测试一下环境噪声水平,发现噪声水平在 45dB 下,故阈值设为 45dB ,主增益为 20dB ,撞击信号定时参数设置为:峰值定义时间

$\text{PDT}=300\mu\text{s}$,撞击定义时间为 $600\mu\text{s}$,撞击锁定时间为 $1000\mu\text{s}$,声速为 4549m/s 。在钢绞线拉伸试验整个过程中采用声发射技术来监测它的损伤演化。试验加载步骤为缓慢加载,直到钢绞线断裂为止,进行全过程声发射监测。

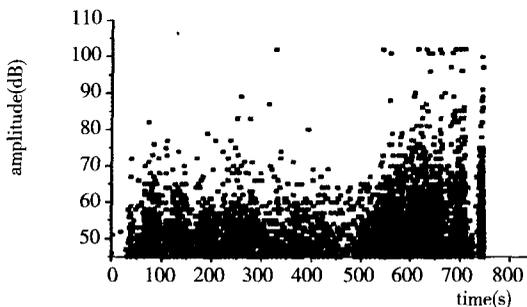
3 实验结果与讨论

3.1 桥梁拉索损伤声发射特征

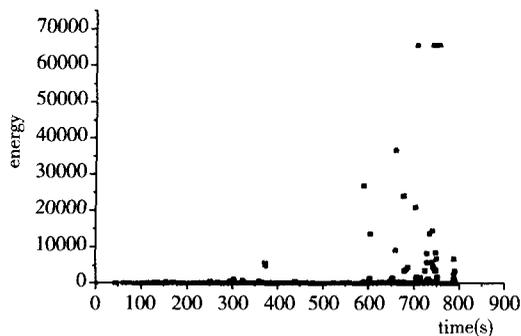
桥梁拉索的损伤监测是应用声发射技术最主要的目的。为了量化表征损伤过程,最合适的参数分析方法就是相关点图分析,通过不同的声发射参数两两组合,发现用声发射计数、能量、持续时间、幅值以及时间的相关图分析,很容易描述桥梁拉索的损伤过程,它们的相关图如图2所示。



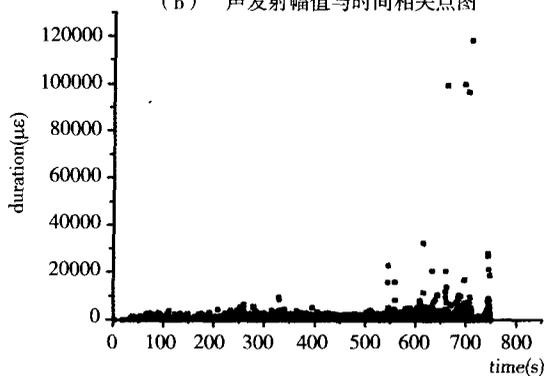
(a) 声发射计数与时间相关点图



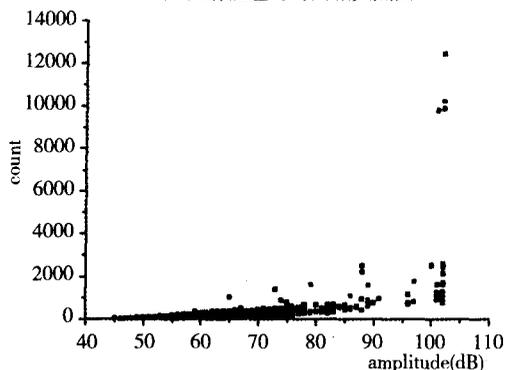
(b) 声发射幅值与时间相关点图



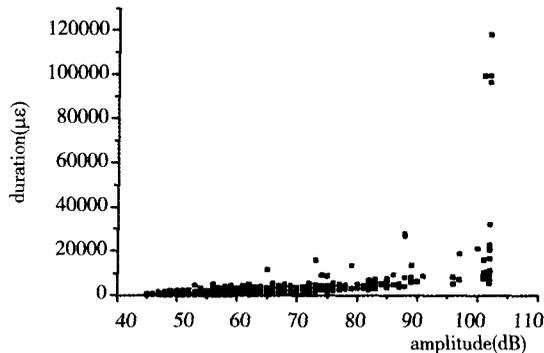
(c) 声发射能量与时间相关点图



(d) 声发射幅值持续时间与时间相关点图



(e) 声发射幅值与计数相关点图



(f) 声发射幅值与持续时间相关点图

图2 声发射特征参数相关图

从图2的几幅相关图我们可以看出,钢绞线一加载,就产生少量的声发射信号,但是,钢绞线在屈服变形之前,声发射特征参数并不明显,屈服阶段之后,声发射的特征参数逐渐增大,在断裂时,声发射特征参数迅速增大,钢绞线损伤声发射信号具有突发性。这说明钢绞线损伤裂纹形成及其缓慢扩展过程历时较长,一旦进入快速扩展阶段,裂纹迅速发展。并且从上面的相关图我们还可以看出,能够容易区分断丝和非断丝信号,断丝信号具有高幅值、高能量、持续时间较长等特点;还可以判断断丝的发生时刻。为了判断断丝的位置,我们采用声发射直线定位方法来验证断裂位置的正确性,定位结果如图3所示。

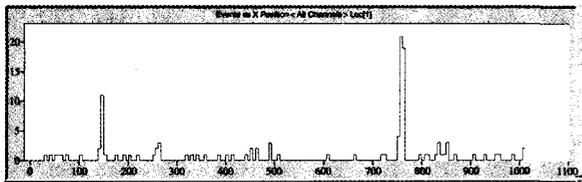


图3 声发射特征参数相关图

试验后,我们拆开实验装置进行检查并测量,断丝的位置出现在145mm、250mm、756mm位置处。从上图可以看出,声发射的定位结果跟实际情况非常吻合,误差在5%左右,具有很高的精度。

从上面的声发射参数相关图和定位结果图可以看出,声发射技术能够进行桥梁拉索损伤的全过程监测,还可以判断断丝的发生时刻和准确定出断丝的位置。

4 声发射参数时间序列分形理论预测桥梁拉索的损伤演化

对钢绞线拉伸试验时所得到的声发射幅值、能量、计数等声发射曲线进行观察,不同的声发射过程或同一过程的不同状态下,声发射的测试结果具有某种程度的相似性。我们知道材料断口存在分形特征,表明其生成的物理机制中可能存在分形过程,而作为这一过程的伴生现象,声发射参数序列就有可能存在分形特征。因此,我们可以将描述时间序列分形特征的分形维数引入到钢绞线失效的声发射监测中来。

4.1 桥梁拉索拉伸损伤声发射过程的分形特征

为了考察桥梁拉索拉伸损伤声发射过程在自相似意义下是否具有分形特征,首先引入声发射参数的分形维数概念。运用Higuchi算法来计算声发射参数时间序列的分形维数。这种算法主要着眼于计算时间序列的路径长度,从而计算时间序列的分形维数。对于时间序列 $X(j)$ ($j=1,2,\dots,N$), Higuchi算法首先计算这个时间序列图的部分路径长度。

$$L_m(k) = \left\{ \left(\sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \right) \times \frac{N-1}{[(N-m)/k] \cdot k} \right\} / k \quad (1)$$

其中, k 为时间序列分块大小, $m=1,2,\dots,k$, $[a]$ 表示 a 的整数部分, N 表示时间序列的长度。

然后再计算时间序列图的归一化长度:

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \left\{ \frac{N-1}{k^2} \left(\frac{1}{[(N-m)/k]} \right) \cdot \sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \right\} \quad (2)$$

式中符号意义同(1)式,具体详细推导过程见文献[6]。

通过(2)式可知,对于每给定一个 k ,可求出一个 $L(k)$,对于给定 n 个 k 值,在双对数坐标中可得到 n 个坐标点 $[\log(k), \log(L(k))]$ 。对 n 个点采用最小二乘法进行拟合,如果拟合成直线,说明声发射参数时间序列在给定的尺度范围内具有分形特征,拟合直线的负斜率即为声发射时间参数序列的分形维数。图4为钢绞线拉伸过程中声发射计数在应力水平为0.3和0.7倍破坏应力时的线性拟合图,线性回归的相关系数都大于0.99,这表征声发射参数时间序列具有明显的分形特征。并发现在不同应力水平状态下,分形维数值不等,说明不同应力状态下声发射过程具有不同的自相似程度。

4.2 桥梁拉索损伤演化声发射过程的分形分析

根据前面分析可知,在钢绞线拉伸过程中所得到的声发射参数时间序列具有很好的分形特征,且在不同的应力状态下具有不同的分形维数值。我们能否利用分形维数值的变化规律来揭示钢绞线损伤演化过程呢?利用上面的实验得到的声发射计数时间序列,分别计算出不同应力状态下声发射过程的分形维数。分形维数变化曲线如图5所示。

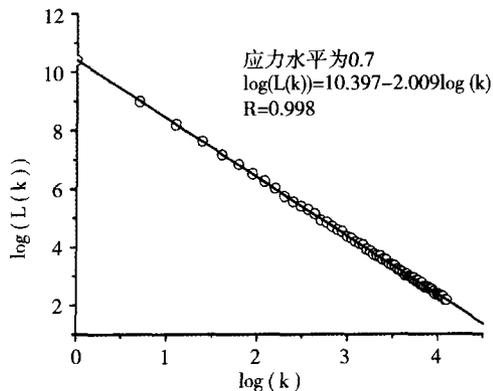
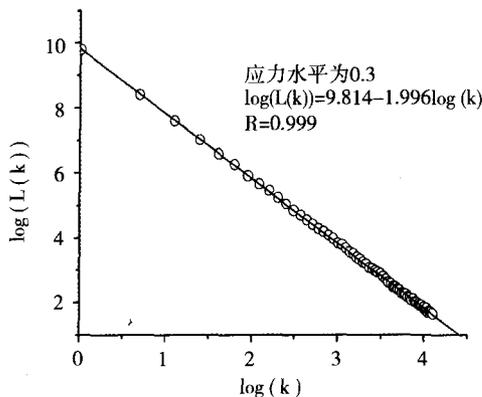


图4 不同应力水平下钢绞线损伤声发射计数的分析特征及维数

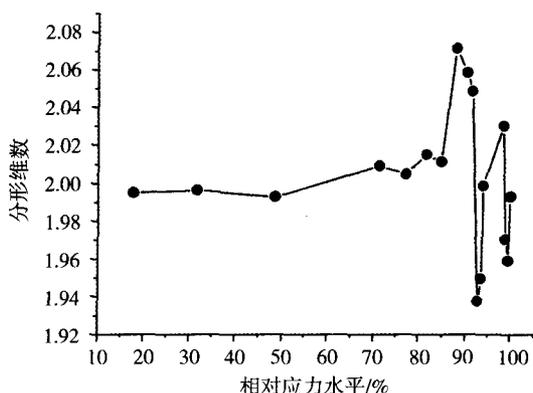


图5 钢绞线拉伸过程声发射分形维数变化曲线

从图5可以看出,在加载初中期声发射计数时间序列的分形维数变化不大,复大复小,变化规律不明显,但是在加载后期,分形维数值变化非常剧烈,尤其在0.9倍破坏应力处,出现一个“最大-最小”变化模式,这说明这一时刻是裂纹进入快速扩展的转折时刻。根据前面钢绞线拉伸试验声发射监测结果可知,裂纹形成及其缓慢扩展过程历时较长,一旦进入快速扩展阶段,裂纹迅速发展,说明其物理变化机制中存在突变的成分,而声发射计数时间序列分形维数的“最大-最小”模式正是这一物理机制的外部反应。因此,我们可以将这种模式作为钢绞线临界损伤破坏的判断依据,从而进行钢绞线失效预警。

5 结论

由于常规无损检测方法不能动态监测钢绞线损伤演化过程,本文提出采用声发射技术来监测桥梁拉索整个拉伸过程中的损伤。首先运用声发射参数相关图分析法来揭示桥梁拉索整个拉伸过程中的损伤状况,然后,利用得到的声发射参数

时间序列,采用分形理论预测了桥梁拉索损伤演化规律,取得的主要结论如下:

(1) 通过声发射特征参数两两组合,发现用声发射计数、能量、持续时间、幅值以及时间的相关图分析,很容易描述钢绞线的损伤过程。

(2) 通过声发射特征参数相关图发现,钢绞线损伤裂纹形成及其缓慢扩展过程历时较长,一旦进入快速扩展阶段,裂纹迅速发展。利用声发射直线定位方法能够准确判断钢绞线断裂位置。

(3) 利用得到的声发射计数时间序列,验证了钢绞线拉伸损伤声发射过程具有分形特征。并利用不同应力状态下的分形维数表征了钢绞线损伤演化过程,并发现当钢绞线进入快速扩展阶段,分形维数出现“最大-最小”变化模式,我们可以将这种模式作为钢绞线临界损伤破坏的判断依据,从而进行钢绞线失效预警。

参考文献

- [1] Dong Sheng Li, Jin Ping Ou. "Arch bridge suspenders corrosion fatigue life assessment method and its application," *Journal of highway and transportation research and development*. 8(22): 106-109 (2005).
- [2] Casey. N.F, Taylor. J.L. "The evaluation of wire ropes by acoustic emission techniques," *British Journal of NDT*. 27(6): 351-356 (1985).
- [3] Drummond. G, Watson. J.F, Acarnley. P. P. "Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatiguetesting," *NDT&E International*. 40:94-101(2007).
- [4] Sikorska.J.Z, Kelly.P.J, Pan. J. "Development of an AE data management and analysis system," *MechanicalSystems and Signal Processing*. 20: 2321-2339(2006).
- [5] Carpinteri.A, Lacidogna. G, Pugno. N. "Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring," *Engineering Fracture Mechanics*. 74:273-289 (2007).
- [6] Higuchi.T. "Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory," *Phys D*. 31: 277-283(1988).