

文章编号: 1002-0268 (2007) 09-0057-04

钢绞线拉伸过程中的声发射特征 及其损伤演化模型

李冬生, 欧进萍

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 针对常规的无损检测方法不能够动态跟踪钢绞线的损伤演化过程, 提出了采用声发射技术来监测钢绞线的损伤演化。利用钢绞线的拉伸试验, 对其损伤全过程进行了声发射监测, 得到了钢绞线拉伸损伤全过程的声发射特征信号: 钢绞线在断裂之前, 声发射特征参数并不明显, 在接近断裂时, 声发射信号迅速增大, 并在屈服点附近出现一个大的突发信号。通过声发射机理分析, 发现声发射累积能量可作为钢绞线损伤的特征参量, 能动态分析钢绞线损伤演化过程和规律, 较容易判断断丝的根数和发生的时刻。利用声发射累积能量的相对变化来定义钢绞线损伤因子, 推导了用声发射特征参数表示钢绞线损伤演化方程, 此方程可用威布尔累积分布函数来描述, 并对其正确性与合理性给予了验证与分析。

关键词: 桥梁工程; 损伤演化模型; 声发射; 钢绞线; 健康监测; 声发射累积能量

中图分类号: U444.03

文献标识码: A

Acoustic Emission Characteristics and Damage Evolution Model of Steel Strands in Tensile Test

LI Dong-sheng, OU Jin-ping

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China)

Abstract: Conventional non-destructive methods can't dynamically monitor the steel strands damage evolution process, so acoustic emission technique is proposed to monitor the damage. Experiments on acoustic emission characteristics of full-regime steel strands tensile failure are carried out. Acoustic emission characteristic parameters of steel strand damage are obtained. The testing results show that the acoustic emission characteristic parameter isn't apparent before fracture, the acoustic emission signal increases rapidly when approaching critical fracture point and appears a big burst signal nearby yield point. According to the correlation figure of acoustic emission accumulative energy, damage characteristic parameter of steel strand can be expressed through acoustic emission accumulative energy, the damage evolution process and law can be dynamically analyzed and broken strand numbers and time are very easily judged. Based on the monitoring data, the relationship between acoustic emission parameter and damage variables is derived. The steel strand tensile damage evolution equation is defined with acoustic emission accumulative energy relative change, the equation can be expressed using Weibull Cumulative distribution function, its rightness and rationality are verified through experiments.

Key words: bridge engineering; damage evolution modal; acoustic emission; steel strand; health monitoring; acoustic emission accumulative energy

钢绞线由于具有抗拉强度高、长度不受限制、比较柔软易于盘弯、运输方便、螺旋外形等优点, 现已广泛应用于桥梁拉索和预应力混凝土结构体系中^[1]。但是, 钢绞线经常在恶劣的环境中工作, 空气中的水

分、氧气和腐蚀介质(如雨水中杂质、烟尘、表面沉积物等联合作用)的侵入, 致使钢绞线发生化学和电化学作用, 在其表面形成蚀坑; 又因为它长期承受动静荷载作用, 这些蚀坑在拉应力作用下, 将不断发

收稿日期: 2006-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50538020); 交通部西部交通建设科技资助项目(200331882010)

作者简介: 李冬生(1977-), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 从事桥梁监测与检测方面研究工作。(hitlidongsheng@126.com)

展,当达到临界状态时,钢绞线将发生断裂(如四川宜宾小南门桥倒塌),造成严重的交通事故和人员伤亡,带来巨大的经济损失和社会影响^[2]。因此,寻找一种快速、安全、可靠的方法来检测钢绞线损伤演化显得非常必要!然而常规的无损检测方法对其不适,与常规的无损检测方法相比较,声发射检测技术是一种动态、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^[3,4]。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^[5],非常适用于钢绞线损伤在线监测及早期或临近破坏预报。

本文首先通过拉伸试验,得到钢绞线整个损伤过程的声发射特征,并根据声发射特征参数的变化,揭示钢绞线拉伸损伤演化过程和规律。然后,将声发射特征参数作为钢绞线拉伸损伤的参数,度量损伤程度,导出声发射参数同损伤变量的关系,并建立用声发射参数表示的钢绞线拉伸损伤演化方程。

1 试验测试装置

本试验在柳州 OVM 机械股份有限公司进行,用 $\phi 15.24$ mm 新钢绞线作为试件,试件总长度为 1 300 mm。为了便于在钢绞线上布设声发射传感器,事先在钢绞线上挤压 2 个锚具,把声发射传感器涂上黄油后布设在锚具外表面上,并用胶带把它固定住。然后把布好传感器的钢绞线放到钢绞线拉力试验机上进行拉伸,具体装置如图 1 所示。为了验证试验的重复性,进行 3 组相同的测试。

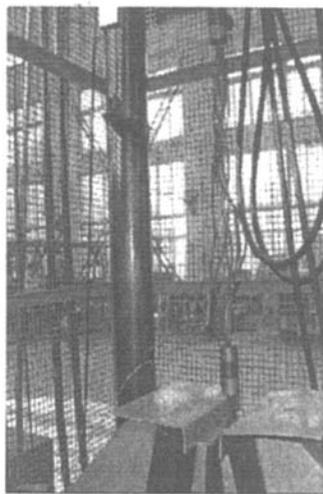


图 1 钢绞线拉伸试验声发射监测装置

Fig.1 AE testing device of steel strand tensile experiment

为了有效去掉环境噪声,先进行环境噪声测试,不断调整声发射装置的阈值水平,找到某一临界点,当阈值低于这一点时,声发射系统能够接收到信号,而高于这一点时,声发射系统基本上接收不到信号,这一临界点即被当作噪声水平。声发射具体参数设置为:传感器的中心频率为 150 kHz,上夹头附近声发射传感器阈值为 46 dB,下夹头附近声发射传感器阈值为 50 dB,前置放大器的增益为 40 dB,主增益为 20 dB,滤波频率为 100 ~ 600 kHz,采样频率为 2 MHz,撞击信号定时参数设置为:峰值定义时间为 300 μ s,撞击定义时间为 600 μ s,撞击锁定时间为 1 000 μ 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。

2 试验结果与讨论

2.1 钢绞线拉伸损伤的声发射特征

钢绞线塑性变形和断裂是产生大量声发射信号的两个主要过程,而塑性变形和断裂产生的声发射信号与材料的损伤、破坏过程有着密切的关系,可以利用钢绞线拉伸过程中的声发射特征参数来监测它的损伤演化。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^[6,7],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,很容易描述钢绞线的损伤过程,它们的相关图如图 2 ~ 图 5 所示。图 2 ~ 图 5 可以看出,钢绞线拉伸过程中,断裂之前,声发射特征参数并不明显,在接近断裂时,声发射信号迅速增大,断丝声发射信号具有高幅值、高能量、持续时间较长等特点。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,钢绞线断裂具有突发性。

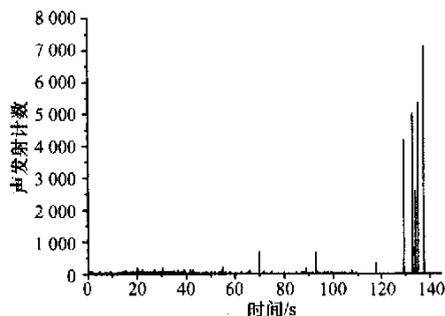


图 2 声发射计数与时间相关点图

Fig.2 The relationship of AE count versus time

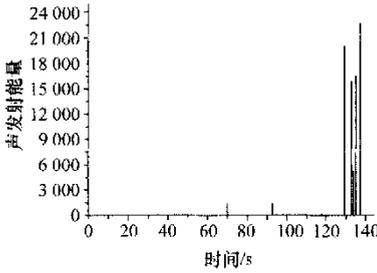


图 3 声发射能量与时间相关点图

Fig.3 The relationship of AE energy versus time

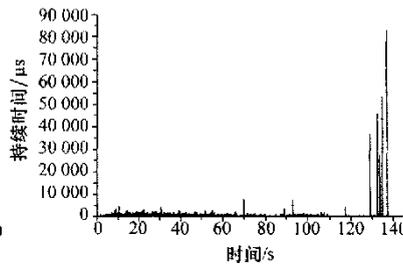


图 4 声发射持续时间与时间相关点图

Fig.4 The relationship of AE duration versus time

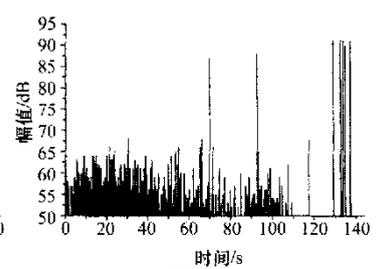


图 5 声发射幅值与时间相关点图

Fig.5 The relationship of AE amplitude versus time

为了进一步说明声发射特征参数与荷载的内在联系, 声发射累积能量与拉伸荷载关系如图 6 所示。

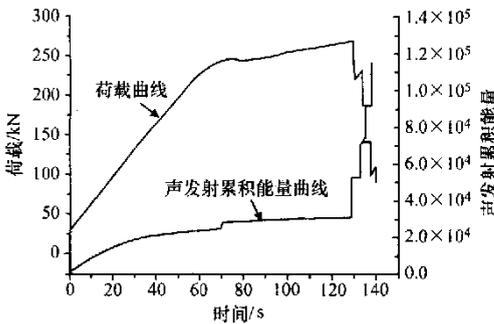


图 6 声发射累积能量与拉伸荷载关系曲线

Fig.6 The relationship of AE accumulative energy and tensile loading

从图 6 可以清晰地看出, 声发射累积能量与拉伸荷载具有同步变化关系, 声发射累积能量参数可以很敏感地反映出材料内部结构性质的微小变化, 在屈服变形点, 出现了一个台阶, 这可为钢绞线的失效变形提供判断依据。钢绞线每断一根丝, 都产生一个大的阶跃信号, 利用声发射累积能量曲线, 可以较容易判断断丝的根数和断丝发生的时刻。实现了以往常规无损检测方法不能动态监测钢绞线损伤全过程破坏。

从图 2~图 6 可以看出, 声发射技术能够很好地定性描述钢绞线的失效变化。这就说明了声发射技术中某些对材料性能变化较为敏感的表征参数, 可以作为评价材料损伤的特征参量^[8]。Fang·F 等人^[9]在应用声发射技术对材料微观结构变化及断裂过程进行长期的研究后, 认为能量这一参数能够很好地反映出材料性能的变化。下面就利用声发射能量这一特征参数来表征钢绞线的损伤演化。

2.2 钢绞线损伤演化模型

钢绞线在外部荷载作用下, 内部将形成大量的微观缺陷, 这些缺陷的形成、扩展、汇合将使钢绞线逐

渐劣化直至破坏。现假设这些损伤是连续的, 且各微元的强度服从概率分布。Krajcinovic 等人提出 Weibull 分布函数 $f(\epsilon)$ 非常适合描述多元材料损伤破坏过程。钢绞线损伤因子 D 与材料微元破坏强度分布概率函数 $f(\epsilon)$ 的关系为:

$$\frac{dD}{d\epsilon} = f(\epsilon) = \frac{\alpha}{\beta} \frac{(\epsilon - \epsilon_0)^\alpha}{\beta} \exp\left[-\frac{(\epsilon - \epsilon_0)^\alpha}{\beta}\right], \quad (1)$$

式中, ϵ 为应变; α, β 为与材料尺寸和变形特性有关的参数; ϵ_0 为试验确定的常数, 主要与材料初始形态有关。

对式(1)进行积分, 可以得到损伤因子的表达式:

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{(\epsilon - \epsilon_0)^\alpha}{\beta}\right]. \quad (2)$$

为了得到具体的损伤因子表达式, 必须确定式(2)中的各个参数。由前面钢绞线拉伸试验的声发射监测结果分析可知, 声发射能量是材料受载后内部变化引起的局部应变能快速释放产生的瞬时弹性波能量的度量, 它是声发射各种参数的综合表现, 损伤的大小跟释放能量息息相关, 声发射能量是它微观变化的宏观表现^[10]。因此损伤因子可以用声发射能量的相对变化来定义:

$$D = \frac{n(\epsilon)}{N_{tot}}, \quad (3)$$

式中, $n(\epsilon)$ 为应变为 ϵ 时的声发射能量值; N_{tot} 为钢绞线临界断裂时的声发射总能量。

钢绞线拉伸损伤过程中声发射累积能量与应力应变关系曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 声发射累积能量随应变的变化与钢绞线的拉伸应力随应变的变化表现了一致性, 这进一步说明了采用声发射技术来监测钢绞线的拉伸损伤过程是完全可行的。根据式(3)损伤因子的定义, 便可得出损伤因子随应变变化的关系曲线。如果式(3)定义的损伤因子是合理的, 由式(2)可知, 它一定可用 Weibull 累积分布函数来拟合。

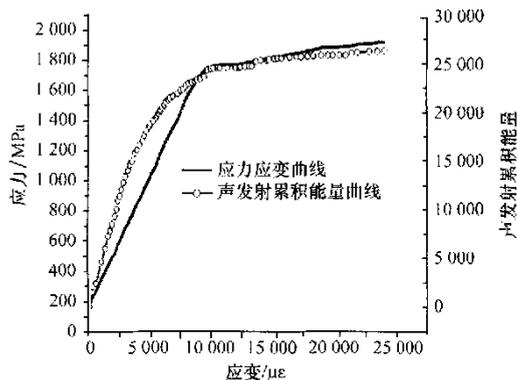


图7 声发射累积能量与应力应变关系

Fig.7 The relationship of AE accumulative energy vs stress-strain

图8给出了采用式(3)定义的损伤因子关系曲线和根据 Weibull 累积分布函数拟合的结果。

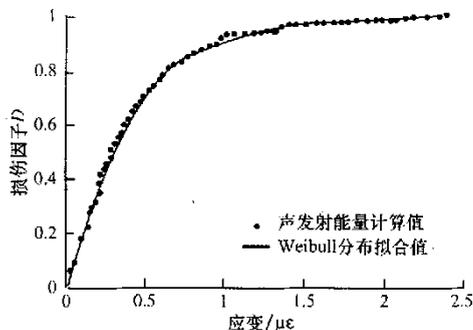


图8 声发射表示的损伤演化曲线

Fig.8 The damage evolution curve using AE parameter expression

从图8可以看出,本文定义的损伤因子计算结果与 Weibull 累积分布函数拟合的结果非常吻合,其相关系数达到了0.994。证明了利用声发射能量的相对变化来定义损伤因子是正确的,根据拟合的结果,便可确定式(2)中的各个参数。这表征采用声发射技术不但可以定性预测钢绞线拉伸损伤变化,还可以定量来刻画损伤演化过程,能动态评价和估计构件的损伤程度,从而为结构的损伤研究和损伤因子的定量分析提供了一种新的方法和途径。钢绞线拉伸损伤演化方程可写为:

$$D = \frac{n(\varepsilon)}{N_{tot}} = 1 - \exp\left[-\frac{(\varepsilon - 237.02)^{0.96}}{2\,921.93}\right] \quad (4)$$

式(4)即为采用声发射累积能量相对变化定义的钢绞线拉伸损伤演化模型,定义的损伤因子具有明确的物理意义,易于测量。

3 结论

(1) 钢绞线拉伸过程中,断裂之前,声发射特征参数并不明显,在接近断裂时,声发射信号迅速增大。断丝声发射信号具有高幅值、高能量、持续时间较长等特点。

(2) 利用声发射累积能量随时间变化图,很容易确定断丝的根数和断丝发生的时间。在钢绞线屈服点附近,声发射累积能量曲线出现了一个突变点,利用此特征,可为钢绞线失效变形提供判断依据。

(3) 由于声发射能量是声发射各种参数的综合表现,损伤大小跟释放能量息息相关,本文提出运用声发射能量的相对变化来定义钢绞线失效的损伤因子,从理论上和试验上验证了这种定义的正确性和合理性,并给出了用声发射参数表示的损伤因子具体表达式,从而为钢绞线的损伤研究和损伤因子的定量分析提供了一种新的方法和途径。

参考文献:

- [1] 孙金茂. 桥梁用预应力钢丝钢绞线的防腐 [J]. 金属制品, 2000, 26 (3): 5-9.
- [2] 邓年春, 欧进萍, 周智, 等. 一种新型平行钢丝智能索 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (3): 82-85.
- [3] SUNIL PURI, JASON WEISS, *et al.* Assessment of localized damage in concrete under compression using acoustic emission [J]. *Journal of materials in civil engineering*, ASCE, 2006, 6 (5): 325-333.
- [4] 沈功田, 戴光, 刘时风. 中国声发射检测技术进展——学会成立25周年纪念 [J]. 无损检测, 2003, 25 (6): 302-307.
- [5] GASKY N F, TAYLOR J L. The evaluation of wire ropes by acoustic emission techniques [J]. *British Journal of NDT*, 1985, 27 (6): 351-356.
- [6] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法 [J]. 无损检测, 2002, 24 (2): 72-77.
- [7] 邵永波. 声发射技术在钢丝绳损伤检测中应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 1999.
- [8] 刘学文. 用声发射技术评估材料损伤的研究 [D]. 北京: 北方交通大学, 1996.
- [9] FANG D, BERKOVITS A. Acoustic emission during fatigue of a Nickel base superalloy [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 1993, 11 (2): 85-94.
- [10] Li Dong-sheng, OU Jin-ping. Damage evolution prediction and model of cement mortar based on acoustic emission [J]. *SPIE*, 2005, 5 851: 267-272.

钢绞线拉伸过程中的声发射特征及其损伤演化模型

作者: [李冬生](#), [欧进萍](#), [LI Dong-sheng](#), [OU Jin-ping](#)
作者单位: [哈尔滨工业大学, 土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨, 150090](#)
刊名: [公路交通科技](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION RESEARCH AND DEVELOPMENT](#)
年, 卷(期): 2007, 24(9)
引用次数: 1次

参考文献(10条)

1. [孙金茂](#) [桥梁用预应力钢丝钢绞线的防腐](#)[期刊论文]-[金属制品](#) 2000(03)
2. [邓年春](#), [欧进萍](#), [周智](#) [一种新型平行钢丝智能索](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#) 2007(03)
3. [SUNIL PURI](#), [JASON WEISS](#) [Assessment of localized damage in concrete under compression using acoustic emission](#) 2006(05)
4. [沈功田](#), [戴光](#), [刘时风](#) [中国声发射检测技术进展—学会成立25周年纪念](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2003(06)
5. [CASEY N F](#), [TAYLOR J L](#) [The evaluation of wire ropes by acoustic emission techniques](#) 1985(06)
6. [沈功田](#), [耿荣生](#), [刘时风](#) [声发射信号的参数分析方法](#)[期刊论文]-[无损检测](#) 2002(02)
7. [邵永波](#) [声发射技术在钢丝绳损伤检测中应用研究](#)[学位论文] 1999
8. [刘学文](#) [用声发射技术评估材料损伤的研究](#)[学位论文] 1996
9. [FANG D](#), [BERKOVITS A](#) [Acoustic emission during fatigue of a Nickel base superalloy](#) 1993(02)
10. [Li Dong-sheng](#), [OU Jin-ping](#) [Damage evolution prediction and model of cement mortar based on acoustic emission](#) 2005

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [赵洪平](#), [李元兵](#) [拱桥吊杆损伤退化机理及寿命评估研究进展—城市道桥与防洪2010, ""](#)(1)
该文综述了拱桥吊杆损伤退化机理及其剩余寿命评估方法,通过对吊杆病害、荷载行为及损伤演化模型的概括总结得出:护套损伤演化、钢丝锈蚀和开裂是吊杆损伤退化的主要机理,温度和桥面振动是导致吊杆损伤退化的关键因素.吊杆承载力及寿命评估可根据锈蚀检测结果,采用脆性钢丝模型假设,将吊杆视为串并联系统,用极值III型分布或蒙特卡罗法模拟.针对实桥检测、监测、诊断和评估等方面碰到的诸多问题,提出了新的研究路线.

引证文献(1条)

1. [张志研](#), [赵东](#) [木材损伤的声发射模式研究](#)[期刊论文]-[力学与实践](#) 2009(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gljtkj200709013.aspx

下载时间: 2010年5月31日