

钢筋混凝土腐蚀损伤 超声导波信号小波分析及评价

李幸钰 李冬生

(大连理工大学建设工程学部 辽宁大连 116024)

摘要:本文针对钢筋混凝土中的腐蚀损伤,应用电化学方法对钢筋混凝土小梁进行不同程度的加速腐蚀试验,并对其分别进行超声导波测试,经过首波能量分析,得出腐蚀前后信号能量变化。又分别对原始信号进行小波包分析,得到各腐蚀阶段的小波包能量谱,通过各频段信号的能量分布的变化来诊断结构的损伤程度。用小波包分析得出信号的时频曲线,以及各个损伤阶段的波形特征,损伤类别,和频率分布。

关键词:超声导波 钢筋混凝土 腐蚀 小波分析 损伤估计

1 引言

钢筋的锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的最重要的原因,我国大部分工程项目都处于腐蚀的环境,北方大雪过后使用大量的融雪剂(化冰盐),而道路桥梁却没有为腐蚀设计相应的保护措施;沿海一带由于河砂短缺而滥用海砂,加快了结构中钢筋的腐蚀速度。这些现象导致国家每年花费巨额资金在钢筋腐蚀的修复上,因此,钢筋腐蚀损伤的检测是势在必行的。超声导波检测技术是一项先进的检测技术,国内外的科研工作者进行了大量的实验和理论研究。在国外,P. Cawley等对锚杆无损检测技术进行了较为深入的研究,并开发出了相应的锚杆无损检测仪器^[1]。瑞典的H. F. Thurner提出了超声波能量损耗原理的概念,并指出可用此原理来检测锚杆锚固的密实度^[2]。在国内,吴斌等人分析了带缺陷的钢杆中导波各个模态的不同特性,做出其频散曲线,提出最低阶的纵向模态波形是最重要的波形,为后人的研究提供了重要的理论依据^[3]。焦敬品等人分析超声导波时间-空间传播特性基础上,建立了超声导波检测的空间表述模型^[4]。然而,他们的研究都是对损伤的识别,对损伤程度的检测特别是钢筋混凝土中钢筋损伤程度的探伤少之又少,本文在此基础上,应用超声导波能量特征,对钢筋的腐蚀程度进行了诊断,并对信号进行小波包分析,提取各损伤阶段的信号特征。

2 理论分析

2.1 超声导波在钢筋中的频散曲线

利用MATLAB软件,求解特定频率区域内所有模态的波的频散曲线,实验选用的钢筋的属性是泊松比为0.3,密度 7800kg/m^3 ,弹性模量 210GPa ,直径为 20mm ^[5]。

如图1图(a)是直径为 20mm 钢筋的相速度频散曲线,图(b)是群速度频散曲线,由图还可以看出,在 40kHz 附近的频率,在钢筋中只会产生 $L(0,1)$, $T(0,1)$ 与 $F(1,1)$ 这三个模态而且各种模态超声导波下降的坡度最缓,由于 $L(0,1)$ 模态的导波在 40kHz 附近时频散最不明显,所以在实验中选择 40kHz 为激励频率。

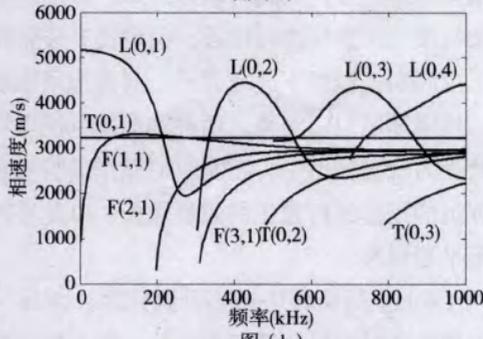
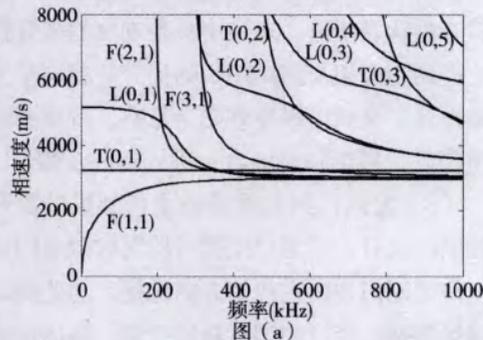


图1 频散曲线

2.2 超声导波的能量计数

时间信号检波包络线下的面积,反映事件的相对能量或强度。

2.3 小波包分解

小波包是由一系列线性组合的小波函数 $\psi_{j,k}^i(t)$ 组成,即:

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k) \quad i=1,2,\dots$$

式中 i 、 j 、 k 分别为频率因子、尺度因子和平移因子。小波包与其相应的小波函数、具有相同的性质,如正交性、时频定位性等。小波包的定义为

$$\psi^{2^i}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t-k)$$

$$\psi^{2^{i+1}}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t-k)$$

这样对于任何一个信号 $f(t) \in L^2(R)$ 都可以进行如下分解:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{2^j-1} f_j^i(t)$$

其中, $f_j^i(t)$ 为第 j 层小波包分解的第 i 个频带的信号,与 $f_{j+1}^i(t)$ 具有如下的关系:

$$f_j^i(t) = f_{j+1}^{2i-1}(t) + f_{j+1}^{2i}(t)$$

$$f_{j+1}^{2i-1}(t) = H f_j^i(t) \quad f_{j+1}^{2i}(t) = G f_j^i(t)$$

式中, $H\{\cdot\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k-2t)$; $G\{\cdot\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k-2t)$,它们是由展开系数 $h(k)$ 和 $g(k)$ 构成的滤波器,其分析树形结构如图2所示。

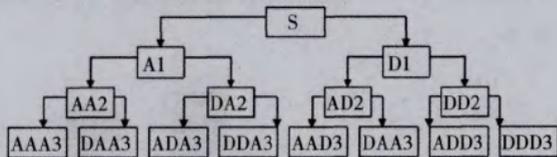


图2 小波包树形结构

2.4 小波包能量谱

每个频带内结构响应 $f_j^i(t)$ 的能量可由下式计算:

$$E_{ij} = \sum |f_j^i(t)|^2 \quad (i=0, 1, 2, 2^j-1) \quad (1)$$

则结构动力响应 $f(N, k)$ 在第 i 分解层的小波包能量谱向量 E_i 可以表征结构的动力特性:

$$E_i = \{E_{ij}\} \quad (i=0, 1, 2, 2^i-1) \quad (2)$$

由于小波包分解后的各个频带宽度相同,所以用小波包分解的结果作为能量谱的输入,按照

各个频带能量的比例关系作出一系列的直方图,若使各直方图的高度和为1,各直方图的高度就代表了各频带能量在总能量中所占的比例。

2.5 检测原理

某一特定模式的波通常是采用具有一定带宽的脉冲来激励,则不同频率分量的超声波将以不同的速度传播,这就意味着超声波的脉冲形状(即包络线)要随传播距离的变化而变化。如果频散现象比较严重,信号包络线的峰值幅度随钢筋腐蚀程度的增加而减小,即导波的能量计数。

3 实验研究

3.1 实验概况

试件尺寸采用长宽高分别为500mm×120mm×150mm,钢筋保护层厚度为20mm,混凝土强度等级采用C30,钢筋采用直径为20mm的HRB400级热轧带肋钢筋,为了腐蚀时超声导波检测的需要,钢筋伸出混凝土外100mm,尺寸如图3所示。

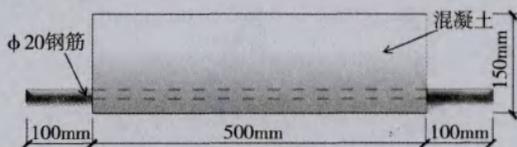


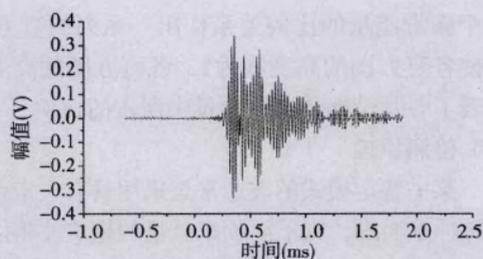
图3 混凝土梁的尺寸

为了在短时间内获得较高的腐蚀量采用电化学加速腐蚀,选择钢筋作为稳定电流计的阳极,钢板作为稳定电流计的阴极,放入电解池中进行电解,选用钢筋电化学加速腐蚀电流大小为0.3A,对五个试件腐蚀的天数分别选为5天,10天,15天,20天和0天。编号分别为1、2、3、4、5。5号试件没有加任何腐蚀,做对照用。腐蚀时,每隔一天用超声导波设备对试件进行超声导波检测,每天记录腐蚀电流和电压的大小。

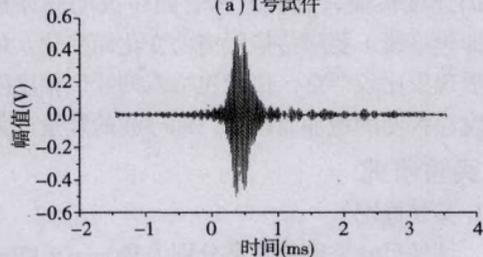
利用超声导波设备对钢筋混凝土中的钢筋进行检测。超声导波激励信号选用中心频率为40kHz经汉宁窗调制的五周期正弦波。

3.2 实验工况

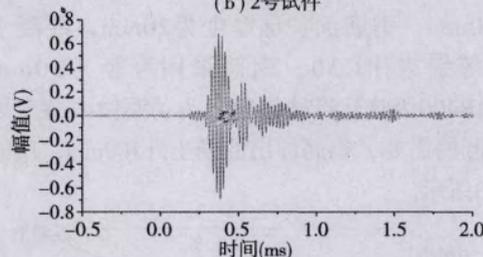
钢筋混凝土试件在腐蚀前,各个试件的超声导波检测时域信号如图4所示;将各个钢筋混凝土试件在腐蚀结束后,用超声导波检测仪器进行检测,得到各个试件腐蚀后的时域信号和频域信号,如图5所示。



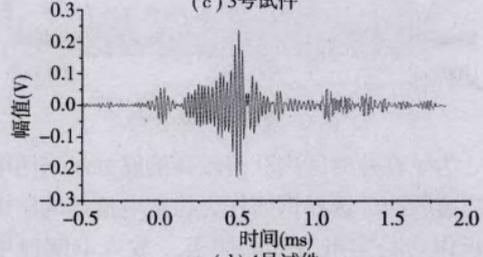
(a) 1号试件



(b) 2号试件

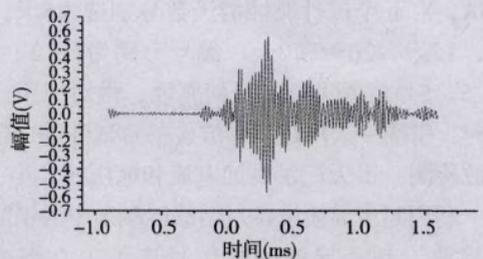


(c) 3号试件

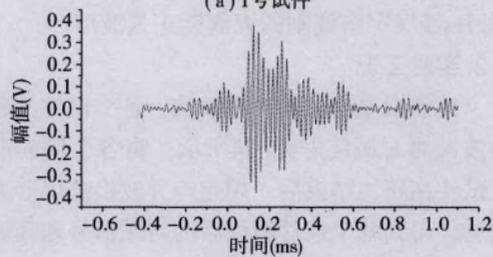


(d) 4号试件

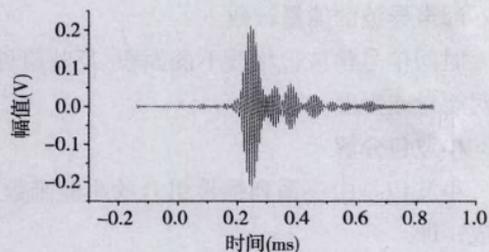
图4 腐蚀前时域信号图



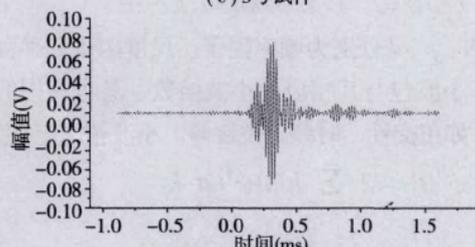
(a) 1号试件



(b) 2号试件



(c) 3号试件



(d) 4号试件

图5 腐蚀后时域信号

4 实验数据分析

4.1 能量分析

随着腐蚀程度的加深, 缺陷变多, 造成首发波峰值降低, 导致首波的能量损失, 本文利用origin软件分别算出各腐蚀阶段腐蚀前首波能量计数值 E_i 和腐蚀后的首波能量计数值 E'_i , 则能量变化率 η 为:

$$\eta = \frac{E'_i - E_i}{E_i} \times 100\%$$

图6为各组试件首波信号能量损失率, 1号试件能量损失是负的, 意味着能量是增加的, 剩下三组随着腐蚀时间的增加, 能量损失率先变大后减小。

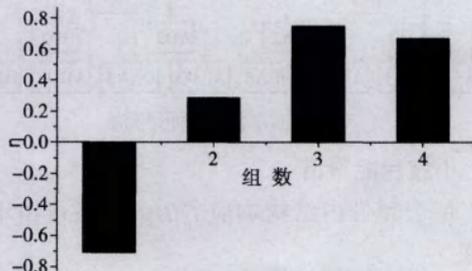


图6 首波能量损失率

4.2 小波包能量分析

应用MATLAB软件将四组试件腐蚀前后的时域信号进行6层小波包分解, 即每组数据共分解出 2^6 即64个频带, 再利用公式(1), (2)编程, 算出各个频带的小波包能量, 做出小波包能

量谱,如图7所示。

为了方便比较,本文分别使每组对应的腐蚀前和腐蚀后的能量谱公用一个横坐标,该横坐标为频带序号,用 n 表示($n \in [1, 64]$);纵坐标为小波包分解后各频带在每个时间点的相对平均能量 E_w ($E_w \in [0, 1]$),即各频带能量占总能量的比例。由于后面频带的能量非常小,几乎可以忽略不计,所以图中只显示前30个频带。

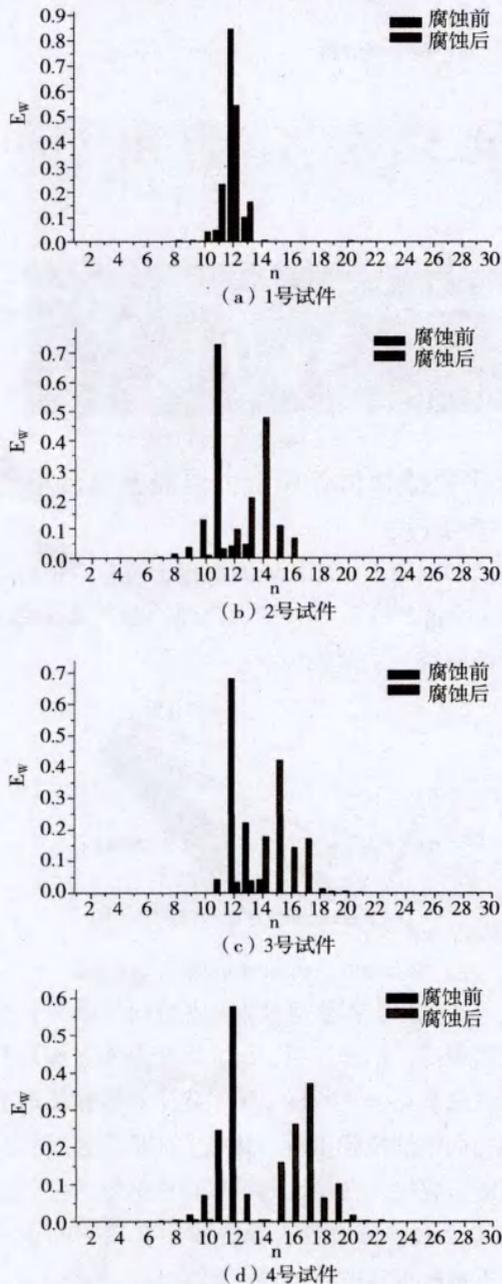


图7 腐蚀前后信号小波包能量谱

从图中可以得出:

(1) 由于钢筋混凝土的钢筋在腐蚀后会产生缺陷,缺陷的杂乱无章,导致超声导波在钢筋内部传播的过程中会发生多次模态转换、反射和折射,所以腐蚀后比腐蚀前检测信号的模态丰富很多,因此图中随着腐蚀时间的增加,信号的频带能量分布会越来越分散。

(2) 由于超声导波的频散作用,钢筋腐蚀越严重,主频能量会越来越偏离原始位置。并且整个频带范围也随着腐蚀的深入,越来越偏离原始范围。

5 结论

(1) 本文通过电化学加速腐蚀钢筋混凝土梁实验,对其分别进行超声导波测试,得出腐蚀前后信号首波能量先增加后减小,而且腐蚀的越严重能量损失越大。

(2) 经过小波包分能量析,得到各腐蚀阶段的小波包能量谱,腐蚀过的试件和未腐蚀的试件相比,最大频带能量所占的比例明显减小。

(3) 通过比较腐蚀前后各频带能量的位置分布,可以看出频带的移动是随着腐蚀时间的增加呈规律变化的,进而可以预估出钢筋不同的腐蚀阶段。

参考文献

- [1] M.J.S.Lowe, D.N.Alleyne, P.Cawley. The Mode Conversion of a Guided wave by a Part-Circumferential Notch in a Pipe[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65: 649-650.
- [2] Thurner H F. Boltometer-instrument for non-destructive testing of grouted rock bolts[C]//The 2nd International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics. Rotterdam: AA Balkema. 1988: 135-143.
- [3] 吴斌, 李隆涛, 王秀彦等. 基于超声导波技术对钢杆表面缺陷的无损检测研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 149-154.
- [4] 焦敬品, 何存富, 吴斌等. 基于时间-空间变换的超声导波检测新技术研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 89-93.
- [5] 李冬生, 元军会. 钢筋缺陷超声导波检测数值模拟及信号分析[J]. 无损探伤, 2013 (002): 18-22