

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.102>



基于 ICEEMDAN 的锚杆锚固缺陷 超声导波无损检测

刘磊磊^{1,2,3}, 朱 骏^{1,2,3}, 张绍和^{1,2,3}, 孙平贺^{1,2,3*}

1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南长沙 410083
2. 湖南省有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

摘 要: 为了对锚固体内部缺陷进行定量检测, 提出利用有限元方法模拟超声导波在缺陷锚杆中的传播过程, 采用改进的自适应噪声完备集合经验模态分解 (ICEEMDAN) 方法处理超声导波反射信号, 并根据分解后的固有模态函数的峰值, 获取缺陷反射波的到达时间, 从而确定锚固缺陷的位置及长度. 参数分析表明, 基于所提出方法推断的缺陷位置与实际情况吻合较好, 并且单个缺陷长度的计算误差为 3.3%, 多个缺陷长度的计算误差在 10% 以内. 因此, 基于 ICEEMDAN 的超声导波法可以作为锚杆内部缺陷检测的有效手段.

关键词: 锚固缺陷; ICEEMDAN; 超声导波; 数值模拟; 无损检测; 灾害; 工程地质.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2025)09-3691-13

收稿日期: 2022-03-02

Non-Destructive Detection of Anchor Defects Using Ultrasonic Guided Wave and ICEEMDAN Method

Liu Leilei^{1,2,3}, Zhu Jun^{1,2,3}, Zhang Shaohe^{1,2,3}, Sun Pinghe^{1,2,3*}

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China
2. Hunan Key Laboratory of Nonferrous Resources and Geological Hazards Exploration, Changsha 410083, China
3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: In order to quantitatively detect the internal defects of anchor, it is proposed to use the finite element method to simulate the propagation process of the ultrasonic guided wave in the defective anchor, and to use the improved adaptive noise complete ensemble empirical mode decomposition (ICEEMDAN) method to process the ultrasonic guided wave reflection signal. Then, according to the peak value in the decomposed intrinsic mode function (IMF), the arrival time of the defect reflection wave is obtained, based on which the position and length of the anchorage defects are evaluated. A series of parameter analyses show that the defect location deduced based on the proposed method is in good agreement with the actual situation, and the calculation error of single defect length is within 3.3%, and the calculation error of multiple defect length is less than 10%. Hence, the ultrasonic guided wave method based on ICEEMDAN can be used as an effective means to detect the internal defects of the bolt.

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No. 2020zzts678).

作者简介: 刘磊磊 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害防治与风险控制方面的研究工作. ORCID: 0000-0001-7799-6027. E-mail: csulll@foxmail.com

*** 通讯作者:** 孙平贺, E-mail: pinghesun@csu.edu.cn

引用格式: 刘磊磊, 朱骏, 张绍和, 孙平贺, 2025. 基于 ICEEMDAN 的锚杆锚固缺陷超声导波无损检测. 地球科学, 50(9): 3691—3703.

Citation: Liu Leilei, Zhu Jun, Zhang Shaohe, Sun Pinghe, 2025. Non-Destructive Detection of Anchor Defects Using Ultrasonic Guided Wave and ICEEMDAN Method. *Earth Science*, 50(9): 3691—3703.

Key words: anchorage defect; ICEEMDAN; ultrasonic guided wave; numerical simulation; non-destructive testing; hazards; engineering geology.

0 引言

锚固锚杆作为一种主动支护方式,具有施工方便、适应性强、可靠性高和成本低等优点,已被广泛地应用于边坡和隧道等地下工程中(王斌等, 2019; 白晓宇等, 2020; 谭飞等, 2021). 在施工过程中,由于不规范的注浆工艺,以及重力、地下水、岩体结构和岩土地质灾害(张永政等, 2017; 孙蓉琳等, 2021; Zhang *et al.*, 2022)等环境因素,锚杆锚固过程中容易产生各种各样的缺陷,如锚固体裂隙、脱锚(Zhang *et al.*, 2020). 这些缺陷会削弱锚固系统与地质体之间的粘结强度,降低锚固系统的加固能力,甚至可能导致锚杆失效,从而造成重大的安全隐患. 因此,需要对锚杆缺陷进行检测,以保证工程的稳定性.

传统的锚固质量检测方法有拉拔试验和取心实验. 然而,这两种方法不但会破坏构件,造成锚固能力的丧失,而且耗时、成本高,无法进行大规模检测. 超声导波锚杆无损检测克服了传统方法的不足,近年来在现场工程检测中得到了广泛应用. 例如,Beard *et al.* (2003)率先将超声导波应用于锚杆的无损检测中,提出了一种脉冲回波技术,可用来评估注浆锚杆的长度和缺陷位置. Cui and Zou (2006)通过测量超声导波的衰减值确定锚杆锚固体长度. Wang *et al.* (2009)通过分析不同锚固强度的锚杆中超声导波的衰减规律,提出利用超声导波在锚杆内传播的衰减系数评价锚杆的粘结质量. Rucka and Zima (2015)和 Yu *et al.* (2019)分别利用超声导波的群速度和反射振幅与衰减系数评估锚杆的灌浆比. 此外,学者们对超声导波的传播特性进行了大量研究. Madenga *et al.* (2006)研究发现锚杆灌浆后养护时间越长,超声导波的衰减越大. Zou *et al.* (2007)讨论了激发频率与注浆长度对导波衰减和群速度的影响,发现在锚固锚杆中,随着激发频率和注浆长度的增加,超声导波衰减增大,且随着激发频率的增大,超声导波的群速度增大. Yu *et al.* (2021)通过数值模拟和室内试验发现锚杆内超声导波群速度随岩石风化程度的增加而减小. Zhang *et al.* (2006)数值模拟了网格密度对超声导波传播特性的影响,得到了数值

模拟中最佳的网格划分方法. 然而,目前利用超声导波对锚杆锚固缺陷的检测研究仍然较少,尤其是在缺陷尺寸的定量检测方面,近乎空白.

另一方面,超声导波在锚固锚杆中传播时,存在着能量衰减的现象,导致接收的反射信号十分微弱,并且在界面处会发生多次反射,同时伴随着超声导波的频散,导致接收的信号十分复杂(Rong *et al.*, 2017); 因此如何从超声导波信号中有效地提取出反射时间,进而获取锚杆缺陷的特征,是当前超声导波检测锚杆锚固缺陷面临的一大挑战. 相位推算法通过主频信号相位的变化来判断反射信号(杨天春等, 2009),但这种方法对弱反射并不有效; 结合 Wigner-Ville 分布和 Hilbert 变换可以在振幅很小的情况下表征反射信号的特征(宋伟, 2013),但由于 Wigner-Ville 分布的双线性特性,导致在信号处理中存在交叉项的干扰; 互相关法通过计算提取的小波信号与第一反射信号的互相关性来确定锚杆长度(Cheng *et al.*, 2012),但是多次反射对这种信号分析方法的结果干扰很大; 小波变换则通过对信号进行分解、去噪和重组,虽可以在多次反射的波形中对反射信号进行放大和提取(夏代林等, 2003; Lee *et al.*, 2012),但利用不同的小波基函数分析同一问题会产生不同的结果,因此限制了该方法的应用(Shi *et al.*, 2018).

改进的自适应噪声完备集合经验模态分解(ICEEMDAN)方法作为一种处理非线性、非平稳信号的手段,对信号的分析具有良好的自适应性(Huang *et al.*, 1998; Colominas *et al.*, 2014). 当锚固体存在缺陷时,接收到的波形信号十分复杂,并且由缺陷界面处反射回的信号十分微弱,ICEEMDAN 方法通过将信号分解为不同的固有模态函数(IMF),可以有效识别出信号中可能被掩盖的微弱信号,并且对多次反射的波形进行解释. 因此,本研究拟通过数值模拟超声导波在锚固缺陷锚杆中的传播规律,提出利用 ICEEMDAN 方法处理反射信号,解决超声导波信号中缺陷处反射信号弱,以及多次反射影响缺陷界面识别的问题,实现锚杆缺陷定量无损检测. 为实现该研究目标,首先通过对锚固体长度的检测,验证 ICEEMDAN 方法分析信号的能力. 继而,构建不同缺陷位置和缺

陷个数的锚固缺陷锚杆模型,探讨缺陷位置及个数对超声导波速度和衰减的影响。

1 基于ICEEMDAN的超声导波锚杆检测方法

1.1 超声导波检测方法

超声导波检测方法主要包括透射法(Lee *et al.*, 2008)和反射法(Yu *et al.*, 2013).透射法需要事先在锚杆底部安装传感器,限制了其在现场的使用.而在超声导波反射法检测中,激励信号通过激发传感器从锚杆端头输入,并由端头的接收传感器接收反射信号,具有一定的优势,因此本研究采用反射法进行超声导波检测.当超声导波在给定几何尺寸和材料参数的介质中传播时,其速度会随频率的变化而变化,但是会以某一特定的最快速度到达接收端(Madenga *et al.*, 2006).为说明该方法检测原理,图1展示了两种锚固情况下的锚杆示意图.对于锚固密实

的锚杆(图1a),锚杆的长度可以通过式(1)计算:

$$L = L_1 + L_2 = \frac{1}{2} C_f \times (t_b - t_g) + \frac{1}{2} C_b \times (t_r - t_b), \quad (1)$$

其中, L 、 L_1 、 L_2 分别表示锚杆长度、自由段长度和锚固体长度(m), C_f 、 C_b 分别代表超声导波在钢筋中的波速和超声导波在锚固密实段中的波速(10^{-3} m/ms), t_b 、 t_r 、 t_g 分别表示锚固体上界面的反射时间、锚杆底部的反射时间和激发波激发时间(ms).

对于图1b所示锚固缺陷锚杆,将缺陷视为钢筋,超声导波检测锚杆的长度按式(2)计算:

$$L = L_1 + L_{21} + L_{22} + L_3 = \frac{1}{2} C_f \times (t_b - t_g) + \frac{1}{2} C_f \times (t_{dd} - t_{ud}) + \frac{1}{2} C_b \times [t_r - t_b - (t_{dd} - t_{ud})], \quad (2)$$

其中, L_3 为缺陷的长度(m), L_{21} 、 L_{22} 分别代表灌浆密实的锚固段上部分长度和下部分长度(m), t_{dd} 、 t_{ud} 分别代表锚固缺陷下界面的反射时间和锚固缺陷上界面的反射时间(ms).

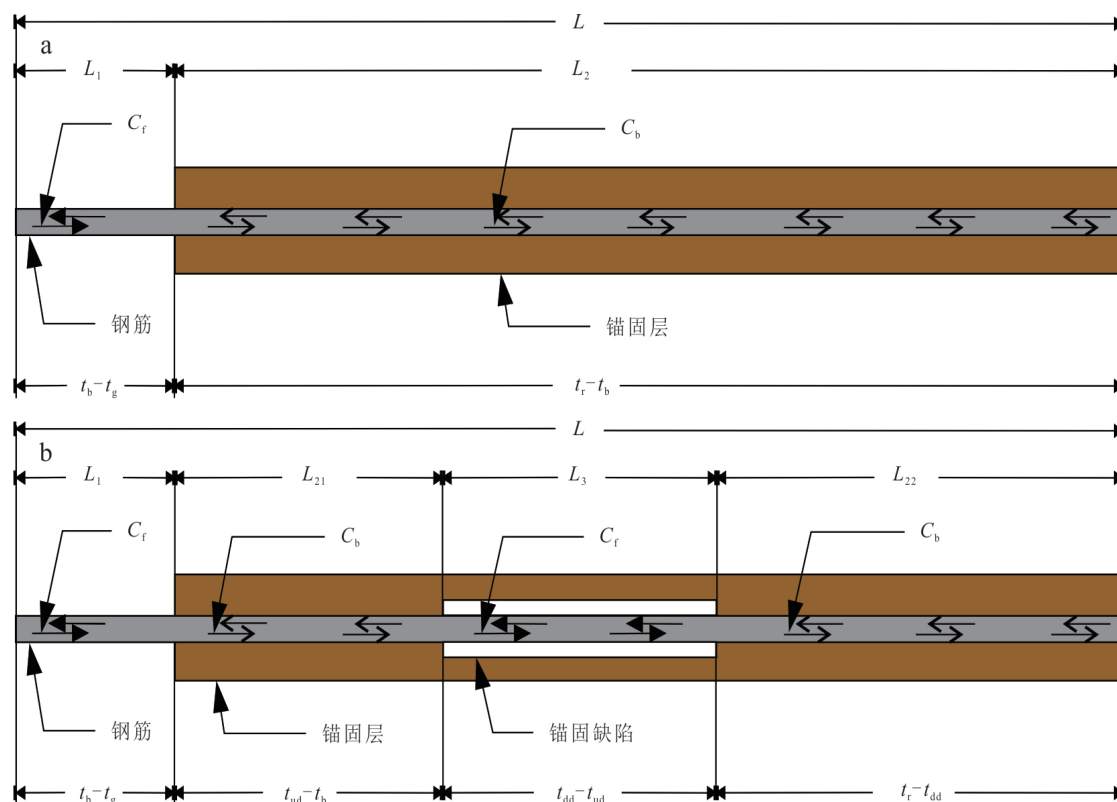


图1 锚固锚杆示意

Fig.1 Schematic diagram of anchoring bolt

a. 锚固密实锚杆; b. 锚固缺陷锚杆

通过模拟计算,可以标定超声导波在钢筋和锚固密实段的波速.然而,由于超声导波在传播过程中与缺陷相互作用特性复杂,且存在能量衰减的现象,微弱的反射信号需要增强,以便在多次反射的波形中提取出缺陷的信号,因此采用 ICEEMDAN 信号分析手段,提取出波形中的反射时间,由此便可以计算缺陷位置和长度,以及锚杆长度和锚固体长度.

1.2 ICEEMDAN 方法原理

对于从锚杆端头获得的超声导波反射信号,该方法通过在此信号中加入经过经验模态分解(EMD)处理后的高斯白噪声和重新定义各模态的局部均值,有效地防止了伪模态和残余噪声模态的发生,增强了信噪比,更精确地将信号分解为不同的固有模态函数(IMF)分量,提高了信号分析能力.ICEEMDAN 的分解过程如下:

(1) 在原始的反射信号 s 中加入 I 组高斯白噪声,构建新的信号 s_i ,并通过 EMD 分解计算信号上下包络线的均值,即局部均值,从而得到第一阶残差 r_1 和 IMF. 其中

$$s_i = s + \beta_0 E_1(\omega^{(i)}), \quad (3)$$

$$r_1 = \langle M(s_i) \rangle, \quad (4)$$

$$IMF_1 = s - r_1, \quad (5)$$

其中, $\omega^{(i)}$ 表示均值和单位方差分别为 0 和 1 的高斯白噪声,且 $i = 1, 2, \dots, I; \beta_0 = \frac{\epsilon_0 \text{std}(s)}{\text{std}(E_1(\omega^{(i)}))}$, 表示高

斯白噪声系数,用于调整添加的噪声与添加噪声后的残差之间所需的信噪比,当 $k \geq 1$ 时, $\beta_k = \epsilon_0 \text{std}(r_k)$, ϵ_0 表示高斯白噪声的幅值,通常设为 0.2, $\text{std}(\cdot)$ 为标准差算子;算子 $E_k(\cdot)$ 为进行 EMD 分解得到的第 k 个模态; $M(\cdot)$ 表示满足 IMF 判定条件的包络线局部均值的算子; $\langle \cdot \rangle$ 代表进行平均值计算.

其中, IMF 判定条件为:极值点数目和过零点数目是否相等或最多相差 1 个;局部均值为 0. EMD 分解过程如下:

a. 设 $j = 0$, 原始信号为 x_j .

b. 通过 3 次样条插值法获得信号 x_j 的局部极大值点与局部极小值点的包络线,即为上包络线和下包络线;将上包络线和下包络线的幅值相加并进行平均,获得局部均值;在 x_j 中减去局部均值,得到新的数据序列 h_j .

c. 根据判定条件判断 h_j 是否为 IMF,若是,则记录为 IMF,计算残差 $x_{j+1} = x_j - \sum_{i=1}^k h_i$,并令 $j =$

$j + 1$, 返回步骤 b;若不是,则将 h_j 作为新的信号重复步骤 b,并再次进行判断至符合判定条件.

d. 当最终残差为一单调函数时,停止计算.

(2) 继续在第一阶残差中加入 I 组高斯白噪声,构建新的待分解信号 $r_1 + \beta_1 E_2(\omega^{(i)})$,并通过 EMD 分解计算局部均值得到第二阶残差和 IMF:

$$r_2 = \langle M(r_1 + \beta_1 E_2(\omega^{(i)})) \rangle, \quad (6)$$

$$IMF_2 = r_1 - r_2. \quad (7)$$

(3) 同理,对于 $k = 3, \dots, K$,可以得到第 k 阶残差:

$$r_k = \langle M(r_{k-1} + \beta_{k-1} E_k(\omega^{(i)})) \rangle. \quad (8)$$

(4) 计算第 k 阶 IMF:

$$IMF_k = r_{k-1} - r_k. \quad (9)$$

(5) 重复步骤 (3) 和 (4). 当残差 r_k 为单调函数时,停止计算,记录获得的 IMF 分量.

经过上述 ICEEMDAN 分解过程,原始超声导波反射信号中不同时间尺度的特征信号可分解为多个 IMF 分量,不同的 IMF 分量有着不同的频率成分,其中存在着包含缺陷处反射特征信号的 IMF 分量,而缺陷处的反射信号在此分量中以波包的形式表现.因此,通过捕捉波包的峰值,即可获取缺陷反射信号到达锚杆端头的时间,进而可以有效检测到锚杆缺陷的位置和长度信息.

2 数值模型

2.1 模型参数

本节采用 Abaqus/Explicit 模块来模拟超声导波在锚杆中的传播.图 2 为锚杆几何模型示意图,由 11 张子图构成,各图锚杆总长固定为 3 m,缺陷位置、尺寸和个数各不相同,分别对应不同模拟工况.其中,图 2a 和 2b 分别是自由锚杆和全长锚固密实锚杆,用于标定超声导波在钢筋和锚固密实段内传播的波速;图 2c 为自由段较短的锚固锚杆,用于验证 ICEEMDAN 的分析能力;为研究缺陷位置以及缺陷个数对超声导波传播特征的影响,图 2d~2f 改变了缺陷距离锚杆端头的位置,图 2g~2i 将缺陷拆分为不同等分;图 2g、2h、2j 和 2k 则为不同缺陷长度的单个缺陷锚杆模型和多个缺陷锚杆模型.上述模型中,钢筋的密度、弹性模量和泊松比分别为 7 850 kg/m³、210 GPa 和 0.3,灌浆材料的密度、弹性模量和泊松比分别为 2 300 kg/m³、20 GPa 和 0.2.钢筋和灌浆材料之间的连接假定是刚性的,并用 Tie 将两者进行约束.

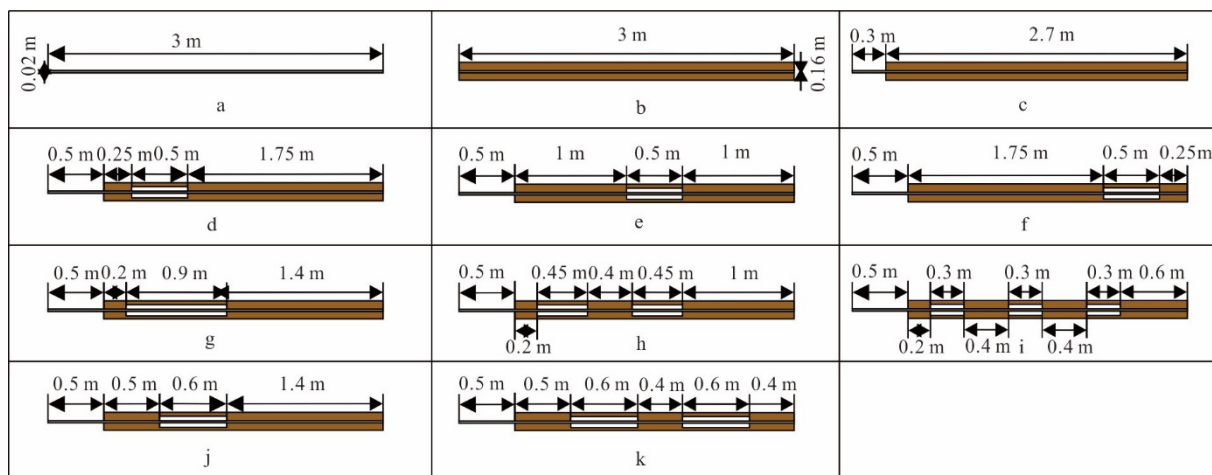


图2 锚杆几何模型

Fig.2 Geometric models of anchors

a. 自由锚杆; b. 全长锚固密实锚杆; c. 锚杆自由段为0.3 m; d. 缺陷位于锚固体上部; e. 缺陷位于锚固体中部; f. 缺陷位于锚固体下部; g. 一个长度为0.9 m的缺陷; h. 两个长度为0.45 m的缺陷; i. 三个长度为0.3 m的缺陷; j. 一个长度为0.6 m的缺陷; k. 两个长度为0.6 m的缺陷

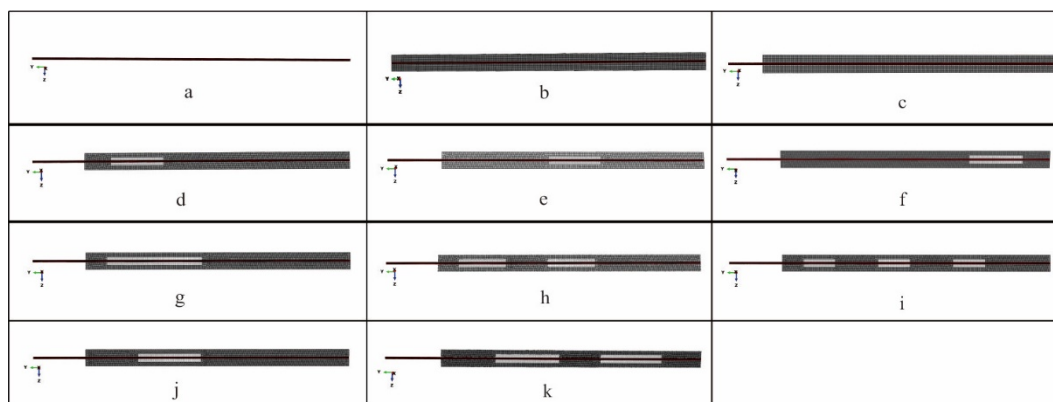


图3 锚杆有限元模型

Fig.3 The finite element models of anchors

2.2 网格尺寸与时间步长

锚杆数值模型采用三维八节点线性减缩积分单元(C3D8R)建立,这种单元可以输入较大的应力与应变,能够有效地模拟锚杆的超声导波的传播过程.为了保证模拟过程的准确性以及计算结果的收敛,网格尺寸应满足小于最小波长的1/10到1/20 (Moser *et al.*, 1999; Maio *et al.*, 2015),时间步长应小于网格尺寸与激励导波的速度之比.因此,模型的网格尺寸选取为3 mm, Abaqus中自动生成的时间步长为 3.13×10^{-7} s,满足要求.锚杆有限元模型示意图如图3所示.

2.3 激励信号

超声导波在低频范围内频散现象较弱,只有少数模态在锚杆中传播,并且在低频段, $L(0,1)$ 模态是传播速度最快的模态 (Zima and Rucka, 2017),

因此,本研究对低频的 $L(0,1)$ 模态超声导波进行模拟,有利于对信号的识别.正弦信号经过汉宁窗调制后,具有更集中的能量,且激发的导波频散影响更小,因此常被用作动态荷载函数.本研究采用的激励信号如图4所示,其中心频率为20 kHz,正弦信号传播5个周期,通过在锚杆端头中间节点垂直端面施加此信号来实现超声导波的激励.激励信号 $F(t)$ 和汉宁窗函数 $\omega(t)$ 的定义如下:

$$F(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t) \cdot \omega(t), & t \in [0, \tau] \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (10)$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right\}, t \in [0, \tau], \quad (11)$$

其中, f_c 为信号中心频率(kHz), n 为周期数, A 为正

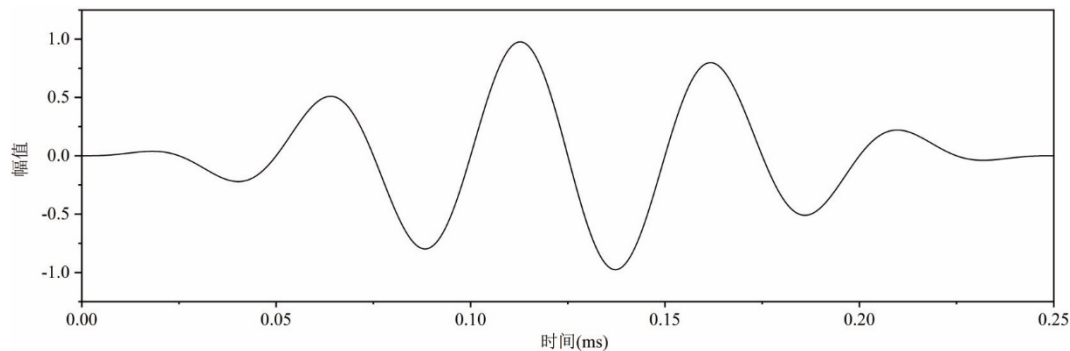


图 4 激励信号
Fig.4 Excitation signal

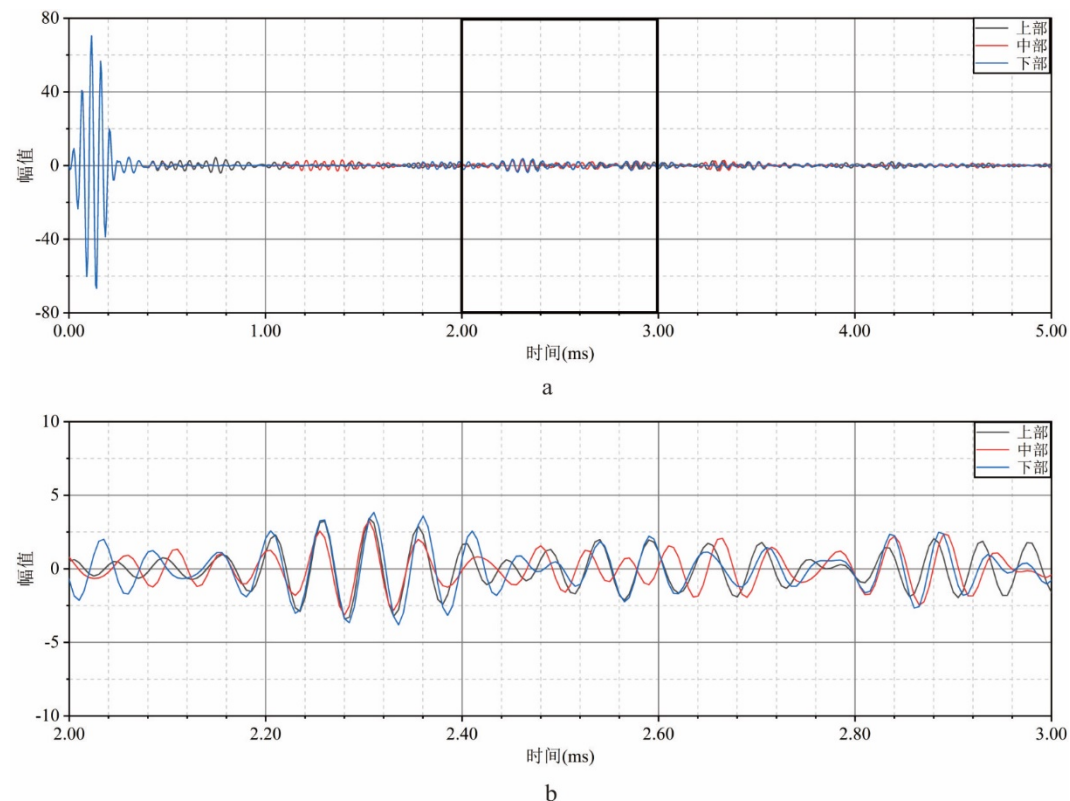


图 5 不同缺陷位置的锚杆中超声导波波形
Fig.5 Waveforms of ultrasonic guided waves in bolts with different defect positions
a. 原始信号; b. 放大后的信号

弦函数幅值,文中取 $1,\tau=\frac{n}{f_c}$ 为窗口长度.

3 结果与讨论

3.1 超声导波在缺陷锚杆中的传播特征

3.1.1 缺陷位置的影响 为了研究缺陷位置对超声导波传播的影响,将同等长度的缺陷分别设置在锚固体上部、中部、下部 3 个位置,如图 2d、2e 和 2f 所示.模拟超声导波在上述 3 个锚杆模型中的传播

行为,得到的反射波形如图 5 所示.由图 5a 中可以看出,不同缺陷位置的锚杆信号同时到达某一位置,此处为锚杆底部的反射信号.对 2 ms 到 3 ms 的波形图放大(图 5b)可以看出,三条曲线在 2.2 ms 到 2.4 ms 的范围内几乎重合,这一结果表明,缺陷的位置不会影响超声导波的波速,也不会影响其衰减.

3.1.2 缺陷个数的影响 如图 2 所示,图 2g、2h 和 2i 中锚杆缺陷总长度均为 0.9 m,但缺陷个数不同,依次为一个缺陷、两个缺陷和三个缺陷,因而可以用

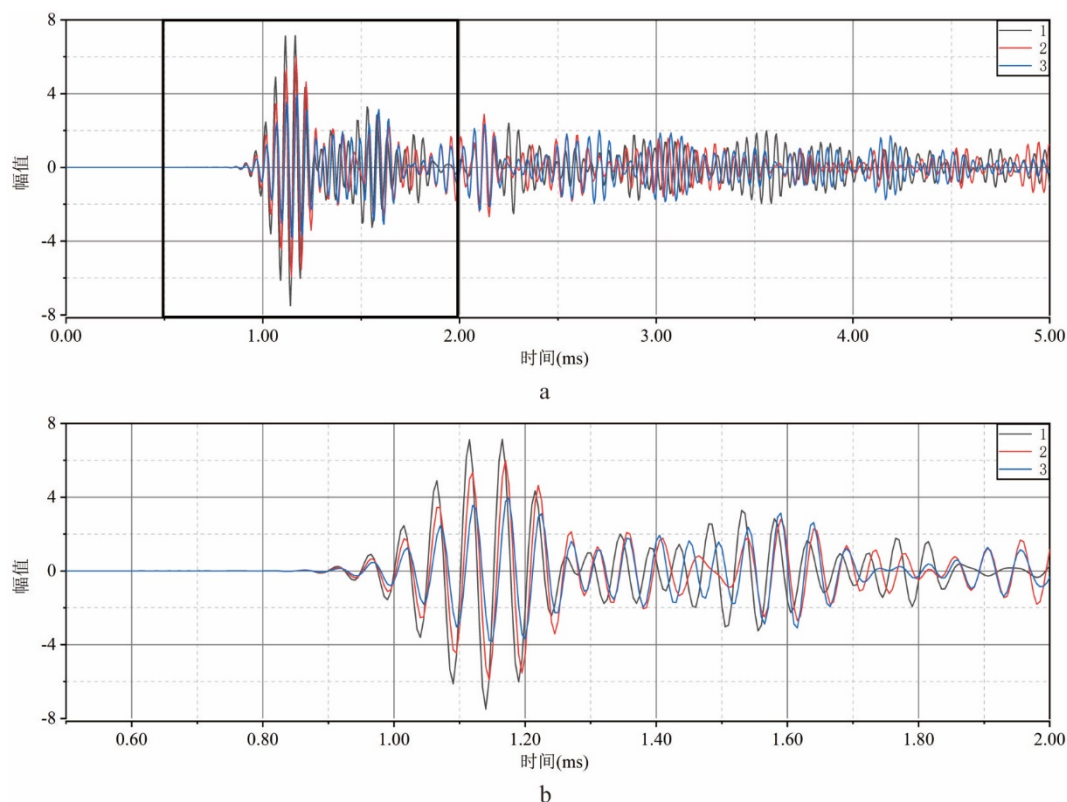


图6 不同缺陷个数的锚杆中超声导波波形

Fig.6 Waveforms of ultrasonic guided waves in bolts with different numbers of defects

a. 原始信号; b. 放大后的信号

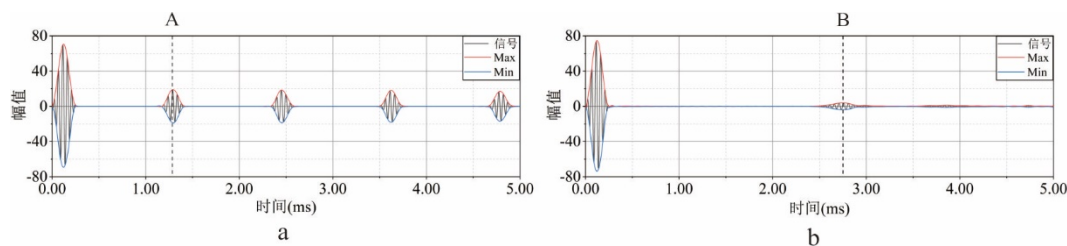


图7 锚杆中超声导波波形

Fig.7 Waveforms of ultrasonic guided waves in bolts

a. 自由锚杆; b. 全长锚固密实锚杆

于研究缺陷个数对超声导波在锚杆中传播的影响。为此,本节分别对上述三个锚杆模型开展超声导波数值模拟研究,在锚杆底部输出模拟结果,如图6所示。从锚杆底部接收到的原始波形图(图6a)中可以看出,在不同缺陷个数的锚固锚杆中,超声导波到达底部的时间是一致的。同时,放大0.5 ms到2 ms内的信号(图6b)可以观察到,从单个缺陷到三个缺陷,信号的幅值逐渐变小。因此,缺陷的个数不会影响超声导波的波速,但随着缺陷个数的增加,超声导波在锚固体内的传播过程更为复杂,导波的能量更多地传递到锚固层中,导致能量的衰减越来越大。

3.2 锚杆检测

3.2.1 波速标定 根据超声导波反射法检测原理,为了分析锚杆长度、锚固段长度、缺陷长度与位置,需要得到超声导波在钢筋和锚固密实段的波速。因此,3.1节设置了自由锚杆和全长锚固密实锚杆模型(分别见图2a和图2b),其中,锚杆总长度均为3 m。对上述两个模型进行超声导波数值模拟,对锚杆端头接收到的反射信号求取包络线,如图7所示,可以清楚地观察到锚杆底部的反射波包,波包的峰值点分别位于虚线A($t=1.285$ ms)和虚线B($t=2.751$ ms)上,即为锚

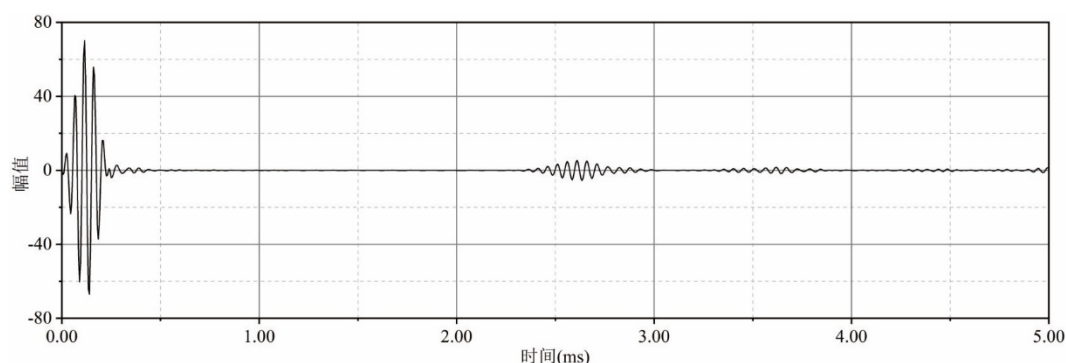


图8 锚杆原始信号

Fig. 8 The original signal of bolt

杆底部反射波到达锚杆端头的时间.激励时间选取激励信号的峰值所对应的时间,即为 0.125 ms.由此可以得到超声导波在钢筋中的波速为 5.172 m/ms,在锚固密实段中的波速为 2.285 m/ms.

3.2.2 锚固体长度检测 当锚杆自由段长度较短时,超声导波从锚固体上界面反射回的波形很可能被掩盖在激励信号中,以至于在原始信号中观察不到锚固体上界面的反射信号,无法检测出锚固体的长度.因此,为了从原始信号中分离出锚固体上界面的反射信号,进而验证本文方法的有效性,本节对图 2c 所示的锚杆模型进行超声导波数值模拟研究,所得到的超声导波原始反射信号如图 8 所示.从图 8 中可以清楚地观察到锚杆底部的反射信号,但是无法捕捉到锚固体上界面完整的反射信号.

因此,对锚杆原始信号进行 ICEEMDAN 方法处理,获得了一系列 IMF 分量,如图 9 所示.从 IMF1(图 9a)中可以看出,激励信号完全被分解出来,从而在 IMF2(图 9b)中可以清晰地识别出锚固体上界面的反射信号(图 9 中的点 A)为 0.27 ms,由式(1)可以计算出锚杆上界面为 0.37 m.锚杆底部信号为 2.6 ms,计算得到锚杆长度为 3.03 m.因此,可以得到锚固体长度为 2.66 m,与模型设置的锚固体之间的误差为 1.5%.

3.2.3 单个缺陷长度检测 为了研究 ICEEMDAN 方法对锚固体中单个缺陷的检测能力,设置了单个锚固缺陷锚杆,如图 2g、2j 所示.

当缺陷长度为 0.6 m 时,超声导波在锚杆中传播的位移云图如图 10 所示.当 $t=0.15$ ms 时,激发波到达锚固体的上界面; $t=0.35$ ms 时,超声导波到达缺陷的上界面; $t=0.50$ ms 时,超声导波传播到缺陷的下界面; $t=1.10$ ms 时,超声导波到达锚杆的底部.模型中自由段与锚固体的交界

处、锚固体内缺陷的上界面、下界面,以及锚杆底部的位置分别为 0.5 m、1 m、1.6 m、3 m.结合超声导波在自由段和锚固段的波速可知,超声导波的模拟传播行为符合理论计算的结果.

对单个锚固缺陷锚杆的原始反射信号进行 ICEEMDAN 处理,并对分解后的 IMF 求取包络线,更准确观察反射点的位置.当缺陷长度为 0.6 m 时,分解后得到的 IMF2 如图 11 所示,可以观察到各个交界处对应的反射时间分别为 0.31 ms(点 a)、0.76 ms(点 b)、1.0 ms(点 c)、2.29 ms(点 d),计算得到各个点的位置为 0.48 m、0.99 m、1.61 m、3.08 m,锚杆的长度为 3.08 m,锚固体长度为 2.6 m,与模型的误差分别为 2.7% 和 3.7%.缺陷的长度为 0.62 m,与模型设置的缺陷之间的误差为 3.3%.另外,图 11 中 A、B、C、D 四条虚线分别表示各个界面反射时间所对应的理论值,基本都处于波包的峰值附近,说明 ICEEMDAN 方法处理后的反射信号结果与理论值符合较好.

当缺陷长度为 0.9 m 时,模型中各个交界处的位置分别为 0.5 m、0.7 m、1.6 m、3 m.原始信号经过 ICEEMDAN 分解后得到的 IMF2 如图 12 所示,可以观察到各个界面交界处对应的反射时间分别为 0.31 ms(点 a)、0.55 ms(点 b)、0.91 ms(点 c)、2.10 ms(点 d),大致处于相应各个界面反射信号的真实值附近,计算得到各个点的位置为 0.48 m、0.75 m、1.68 m、3.04 m,锚杆的长度为 3.04 m,锚固体长度为 2.56 m,与模型的误差分别为 1.3% 和 5.2%.缺陷的长度为 0.93 m,与模型设置的缺陷之间的误差为 3.3%.

3.2.4 多个缺陷长度检测 为了研究 ICEEMDAN 方法对锚固体中多个缺陷的检测能力,建立了多个锚固缺陷的锚杆模型,如图 2h、2k 所示.利用

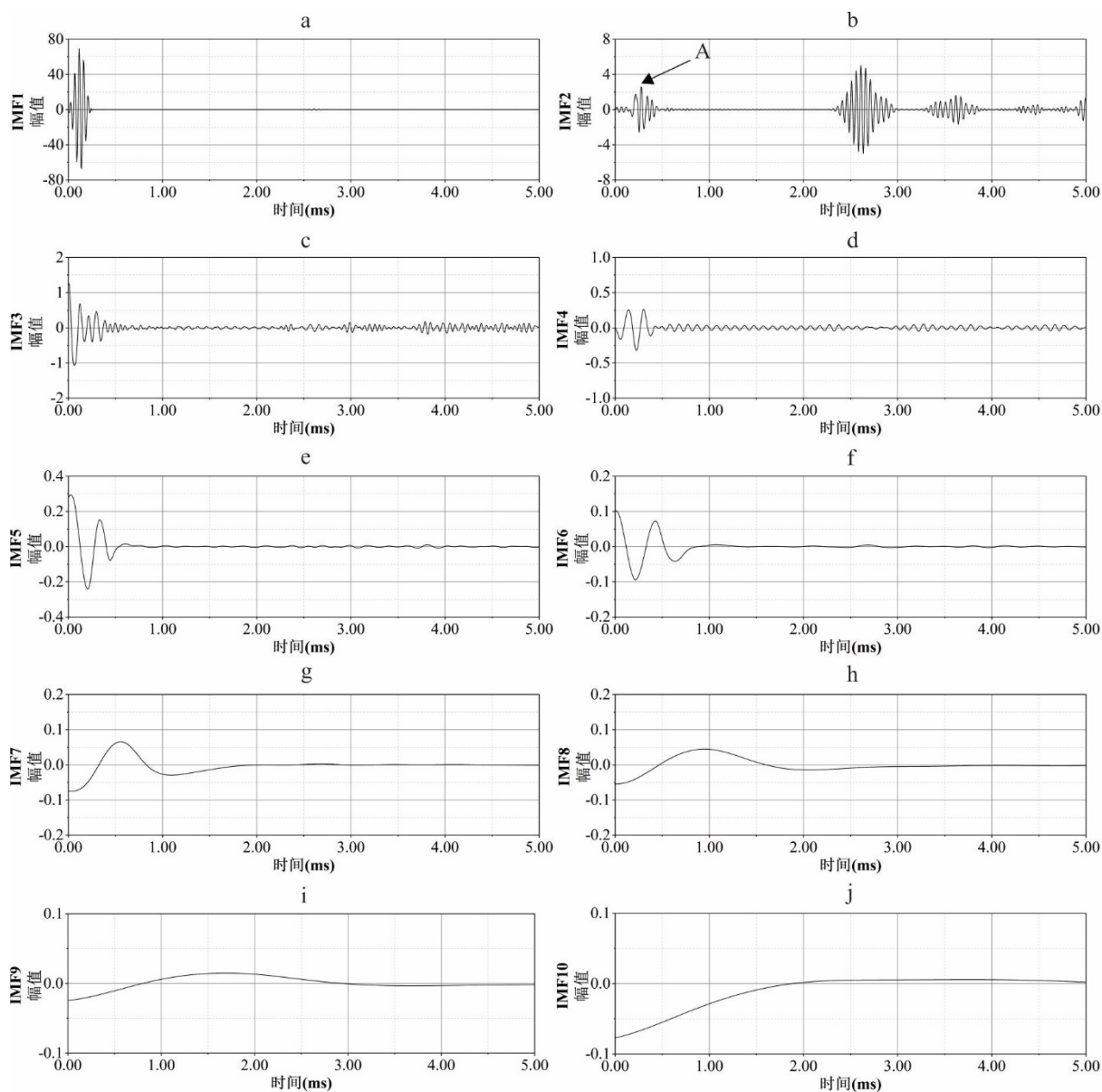


图9 原始信号的ICEEMDAN分解结果

Fig.9 The decomposition results of the original signal by ICEEMDAN

a~j表示 IMF1~IMF10

ICEEMDAN 分解多个锚固缺陷锚杆的原始信号,同样对分解后的 IMF 求取包络线。

当存在两个缺陷且缺陷长度为 0.45 m 时,模型中各个交界处的位置分别为 0.5 m、0.7 m、1.15 m、1.55 m、2 m、3 m。原始信号经过 ICEEMDAN 分解后得到的 IMF2 如图 13 所示,可以观察到各个交界处对应的反射时间分别为 0.31 ms(点 a)、0.54 ms(点 b)、0.73 ms(点 c)、1.07 ms(点 d)、1.33 ms(点 e)、2.13 ms(点 f),计算得到各个点的位置为 0.48 m、0.73 m、1.22 m、1.61 m、2.28 m、3.19 m。其中,e 点的位置与模型的真实值(E 虚线)

相差较大,并且导致锚杆底部的计算结果也产生了很大的误差。分析原因有二:(1)由于锚固体中存在多个缺陷,导致超声导波在传播过程中发生着复杂的多次反射,并且缺陷与锚固体上界面距离很小,同时点 e 所对应的反射位置为第二个缺陷的下界面,其经历的反射与透射行为更为复杂,不同模式的信号相互叠加或抵消,增加了信号分解的难度;(2)同时由于缺陷长度较小,缺陷上界面与下界面到达顶部的时间差很短,很可能出现信号的淹没。

基于第二个锚固缺陷上界面的反射时间,加上单个缺陷 0.45 m 的真实反射时间作为一个新的缺

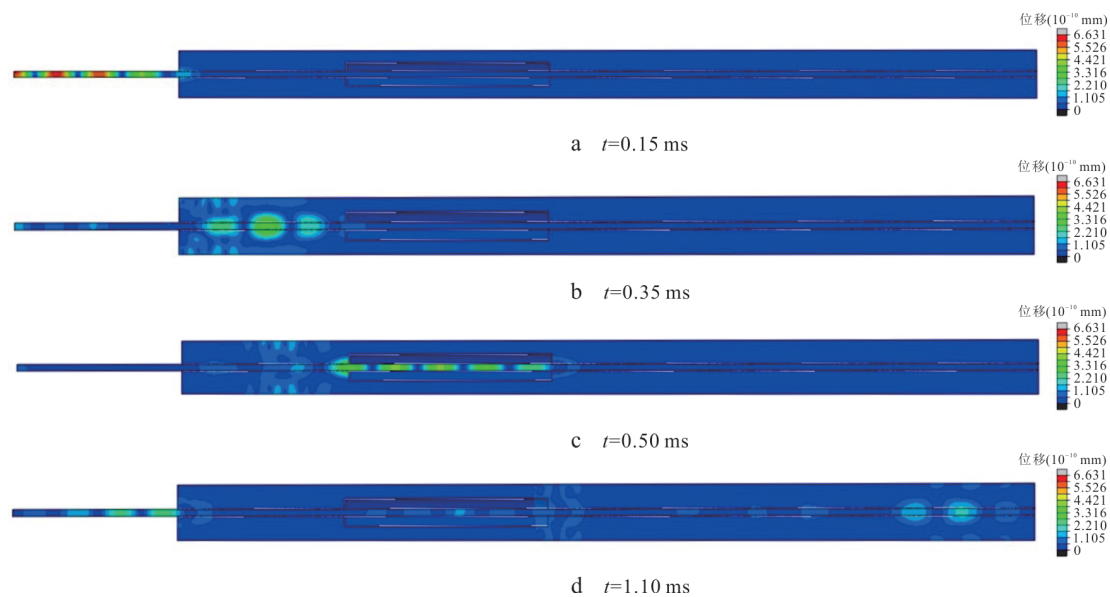


图 10 缺陷锚杆中的超声导波位移云图

Fig.10 Displacement cloud images of ultrasonic guided wave in defective bolt

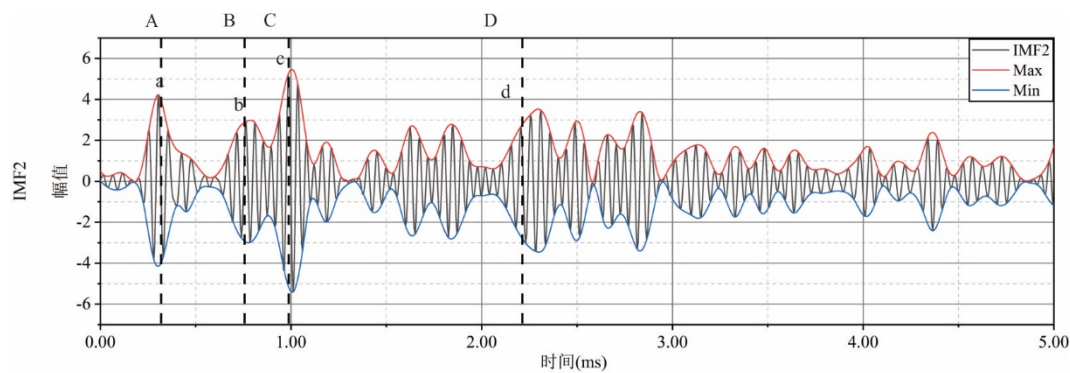


图 11 单一缺陷且长度为 0.6 m 时原始信号的 ICEEMDAN 分解结果 (IMF2)

Fig.11 The decomposition results of the original signal by ICEEMDAN(IMF2) under a single defect of 0.6 m

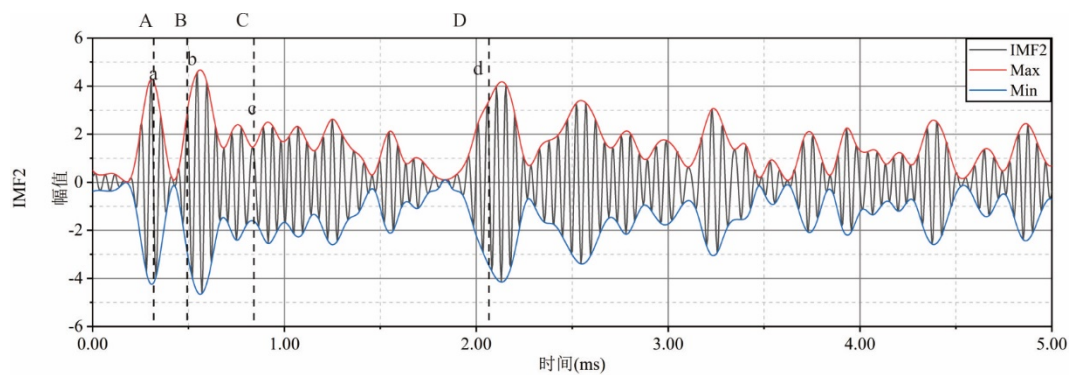


图 12 单一缺陷且长度为 0.9 m 时原始信号的 ICEEMDAN 分解结果 (IMF2)

Fig.12 The decomposition results of the original signal by ICEEMDAN(IMF2) under a single defect of 0.9 m

陷下界面测量值,替代 e 点,从而计算得到锚杆长度为 3.08 m,锚固体长度为 2.6 m,与模型之间的误差分别为 2.7 % 和 3.7 % .bc 段缺陷的长度为

0.49 m,与模型设置的缺陷之间的误差为 8.8 % .
当存在两个缺陷且缺陷长度为 0.6 m 时,模型中各个交界处的位置分别为 0.5 m、1 m、1.6 m、2 m、

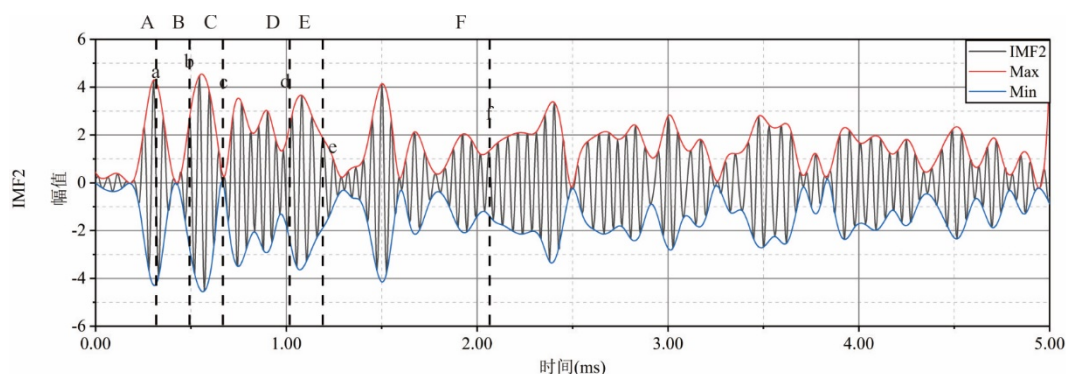


图13 两个缺陷且缺陷长为0.45 m时原始信号的ICEEMDAN分解结果(IMF2)

Fig.13 The decomposition results of the original signal by ICEEMDAN(IMF2) under two equal length defects of 0.45 m

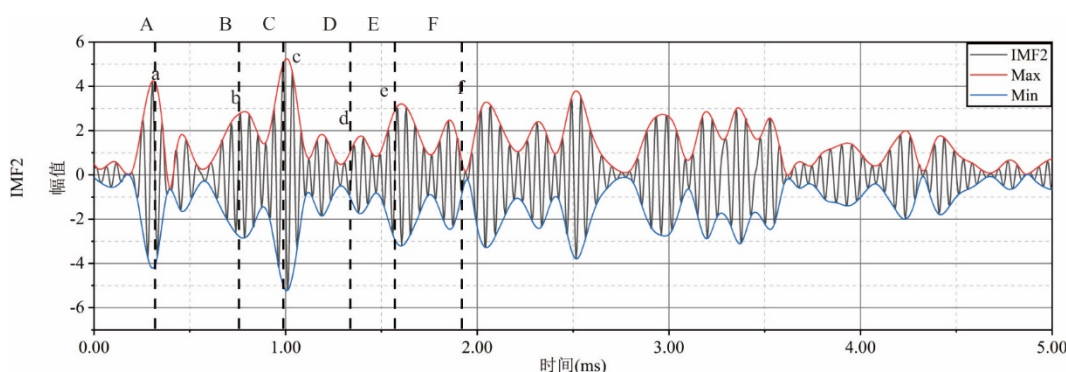


图14 两个缺陷且缺陷长为0.6 m时原始信号的ICEEMDAN分解结果(IMF2)

Fig.14 The decomposition results of the original signal by ICEEMDAN(IMF2) under two equal length defects of 0.6 m

2.6 m 和 3 m. 原始信号经过 ICEEMDAN 分解后得到的 IMF2 如图 14 所示, 可以观察到各个交界处对应的反射时间分别为 0.31 ms(点 a)、0.78 ms(点 b)、1.00 ms(点 c)、1.39 ms(点 d)、1.60 ms(点 e) 和 2.04 ms(点 f), 基本处于相应各个界面反射信号的真实值附近, 获取第二个缺陷下界面的反射时间也与真实值相距很小, 计算得到各个点的位置为 0.48 m、1.02 m、1.59 m、2.04 m、2.59 m 和 3.08 m, 锚杆的长度为 3.08 m, 锚固体长度为 2.6 m, 与模型之间的误差分别为 2.7 % 和 3.7 %. 计算 bc 段缺陷的长度为 0.57 m, de 段缺陷长度为 0.54 m, 与模型设置的缺陷之间的误差分别为 5 % 和 10 %.

对比图 2g 和 2h 所示模型的分析结果可知, 当缺陷总长度相等时, 增加缺陷个数会降低检测结果的准确性. 同时, 对比图 2h 和 2k 所示模型的分析结果可知, 当缺陷个数相同时, 减小缺陷长度也会使得检测结果出现较大误差. 因此, 缺陷长度的检测结果与缺陷的个数和长度都有着密不可分的关系. 对比图 2h 和 2i 所示模型, 前者较后者缺陷个数更少, 且缺陷长度更大. 因此, 可以推断出, 相较于前

者, 后者在缺陷长度的检测结果上会出现更大误差.

4 结论

本文采用三维有限元方法对锚固缺陷锚杆进行了数值模拟, 利用 ICEEMDAN 信号分析方法对模拟信号进行处理, 识别锚固缺陷、锚固体以及锚杆底部的反射信号, 以此计算缺陷的位置及长度、锚杆长度和锚固体长度, 并且讨论了缺陷位置及个数对超声导波的传播规律的影响, 得到的主要结论如下:

(1) 锚固缺陷的位置不会改变超声导波在锚杆中的传播速度, 也不会对超声导波的衰减产生影响.

(2) 相同的锚固缺陷长度, 缺陷的个数不会改变超声导波在锚杆中的波速, 但随着缺陷个数的增加, 超声导波的衰减也越来越大, 说明当锚固锚杆中存在多个缺陷时, 会给锚固质量的检测带来更大的挑战.

(3) ICEEMDAN 方法可以有效地分解超声导波反射信号, 增强锚杆底部和锚固体的微弱反射,

并且能够在多次反射的波形中提取出缺陷的信号,可以准确地计算出单个锚固缺陷锚杆中缺陷的位置及长度、锚杆长度和锚固体长度。

(4)当锚固体中存在两个及以上的缺陷时,超声导波的传播行为更为复杂,发生多次反射,因此难以获取每一个缺陷的准确信息。同时缺陷长度较小时,也会给信号的分析带来很大的挑战。但不可否认的是,该方法在锚固缺陷锚杆检测中的可能性,对该方法的改进可能会在未来的研究中带来重要作用。

References

- Bai, X. Y., Zhang, M. Y., Kuang, Z., et al., 2020. Load Distribution Function Model of Full - Length Bond GFRP Antifloating Anchor. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51(7): 1977—1988 (in Chinese with English abstract).
- Beard, M. D., Lowe, M. J. S., Cawley, P., 2003. Ultrasonic Guided Waves for Inspection of Grouted Tendons and Bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(3): 212—218. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2003\)15:3\(212\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:3(212))
- Cheng, J. L., Sun, X. Y., Feng, L., et al., 2012. Experimental Study on Non-Destructive Testing of Rock Bolts Based on Pseudo-Random Signal. *Safety Science*, 50(4): 783—786. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.034>
- Colominas, M. A., Schlotthauer, G., Torres, M. E., 2014. Improved Complete Ensemble EMD: A Suitable Tool for Biomedical Signal Processing. *Biomedical Signal Processing and Control*, 14: 19—29. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2014.06.009>
- Cui, Y., Zou, D. H., 2006. Numerical Simulation of Attenuation and Group Velocity of Guided Ultrasonic Wave in Grouted Rock Bolts. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4): 337—344. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.04.003>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., et al., 1998. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Non-linear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 454(1971): 903—998. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Lee, I. M., Han, S. N., Kim, H. J., et al., 2012. Evaluation of Rock Bolt Integrity Using Fourier and Wavelet Transforms. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28: 304—314. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.11.009>
- Lee, J. S., Min, B. K., Yu, J. D., et al. 2008. Applicability of Non-Destructive Evaluation Technique for Rock Bolt Integrity Using Time-Frequency Analysis. *Proceedings of the World Tunnel Congress-2008*.
- Madenga, V., Zou, D. H., Zhang, C., 2006. Effects of Curing Time and Frequency on Ultrasonic Wave Velocity in Grouted Rock Bolts. *Journal of Applied Geophysics*, 59(1): 79—87. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.08.001>
- Maio, L., Memmolo, V., Ricci, F., et al., 2015. Ultrasonic Wave Propagation in Composite Laminates by Numerical Simulation. *Composite Structures*, 121: 64—74. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.10.014>
- Moser, F., Jacobs, L. J., Qu, J. M., 1999. Modeling Elastic Wave Propagation in Waveguides with the Finite Element Method. *NDT & E International*, 32(4): 225—234. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00045-0)
- Rong, X., Lin, P., Liu, J., et al., 2017. A New Approach of Waveform Interpretation Applied in Nondestructive Testing of Defects in Rock Bolts Based on Mode Identification. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017: 7920649. <https://doi.org/10.1155/2017/7920649>
- Rucka, M., Zima, B., 2015. Elastic Wave Propagation for Condition Assessment of Steel Bar Embedded in Mortar. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 20(1): 159—170. <https://doi.org/10.1515/ijame-2015-0011>
- Shi, Z. M., Liu, L., Peng, M., et al., 2018. Non-Destructive Testing of Full-Length Bonded Rock Bolts Based on HHT Signal Analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 151: 47—65. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.02.001>
- Song, W., 2013. The Development and Application of Testing Instrument of Bolt Anchorage Based on Chirp Signal (Dissertation). Yangtze University, Jingzhou (in Chinese with English abstract).
- Sun, R. L., He, S. W., Huang, K., 2021. Study on the Influencing Factors of Specific Yield of Unconfined Aquifer Using Laboratory Column Drainage Experiment. *Earth Science*, 46(5): 1840—1847 (in Chinese with English abstract).
- Tang, F., Wang, J., Jiao, Y. Y., et al. 2021. Current Situation and Development of Urban Underground Space Suitability Evaluation. *Earth Science*, 46(5): 1896—1908 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B., Ning, Y., Feng, T., et al., 2019. Uniaxial Mechanical Characteristics of Anchored Sandstone and Its Mechanism of Controlling Buckling Rockburst. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50(9): 2285—2294 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., He, W., Ning, J. G., et al., 2009. Propaga-

- tion Properties of Guided Wave in the Anchorage Structure of Rock Bolts. *Journal of Applied Geophysics*, 69(3-4): 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.08.005>
- Xia, D. L., Lyu, S. L., Xiao, B. X., 2003. An Analysis of Bolt Bonding Integrity Based on Wavelet Time Frequency. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(4): 312-315, 319 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. C., Wu, Y. Q., Xia, D. L., 2009. An Analytic Method for Rock Bolt's Non-Destructive Testing Signals by Phase Deducted Method. *Journal of China Coal Society*, 34(5): 629-633 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. D., Bae, M. H., Lee, I. M., et al., 2013. Nongrouted Ratio Evaluation of Rock Bolts by Reflection of Guided Ultrasonic Waves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2): 298-307. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000767](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000767)
- Yu, J. D., Byun, Y. H., Lee, J. S., 2019. Experimental and Numerical Studies on Group Velocity of Ultrasonic Guided Waves in Rock Bolts with Different Grouted Ratios. *Computers and Geotechnics*, 114: 103130. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103130>
- Yu, J. D., Lee, J. S., Yoon, H. K., 2021. Effects of Rock Weathering on Guided Wave Propagation in Rock Bolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115: 104069. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104069>
- Zhang, C. S., Zou, D. H., Madenga, V., 2006. Numerical Simulation of Wave Propagation in Grouted Rock Bolts and the Effects of Mesh Density and Wave Frequency. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4): 634-639. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.09.006>
- Zhang, W. L., Huang, L., Juang, C. H., 2020. An Analytical Model for Estimating the Force and Displacement of Fully Grouted Rock Bolts. *Computers and Geotechnics*, 117: 103222. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103222>
- Zhang, W. L., Song, Y. H., Huang, L., et al., 2022. Analytical Relations for the Mechanical Properties of Full-Length Bonded Rock Bolts when Subjected to Freeze-Thaw Processes. *Computers and Geotechnics*, 145: 104667. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104667>
- Zhang, Y. Z., Wang, G., Ma, M., et al., 2017. Macro-Micro Study on Failure Mechanism of Rock Mass Anchorage Joints under Different Roughness. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(12): 3373-3383 (in Chinese with English abstract).
- Zima, B., Rucka, M., 2017. Non-Destructive Inspection of Ground Anchors Using Guided Wave Propagation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 94: 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.03.005>
- Zou, D. H., Cui, Y., Madenga, V., et al., 2007. Effects of Frequency and Grouted Length on the Behavior of Guided Ultrasonic Waves in Rock Bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6): 813-819. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.12.002>

中文参考文献

- 白晓宇, 张明义, 匡政, 等, 2020. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆荷载分布函数模型研究. 中南大学学报(自然科学版), 51(7): 1977-1988.
- 宋伟, 2013. 基于 Chirp 信号锚杆锚固质量检测仪器开发与应用(硕士学位论文). 荆州: 长江大学.
- 孙蓉琳, 何世伟, 黄康, 2021. 基于土柱排水实验探讨潜水含水层给水度的影响因素. 地球科学, 46(5): 1840-1847.
- 谭飞, 汪君, 焦玉勇, 等, 2021. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势. 地球科学, 46(5): 1896-1908.
- 王斌, 宁勇, 冯涛, 等, 2019. 加锚砂岩单轴力学特性及屈曲型岩爆控制机制. 中南大学学报(自然科学版), 50(9): 2285-2294.
- 夏代林, 吕绍林, 肖柏勋, 2003. 基于小波时频分析的锚固缺陷诊断方法. 物探与化探, 27(4): 312-315, 319.
- 杨天春, 吴燕清, 夏代林, 2009. 基于相位推算法的锚杆施工质量无损检测分析方法. 煤炭学报, 34(5): 629-633.
- 张永政, 王刚, 马明, 等, 2017. 不同粗糙度下锚固节理破坏机理宏观研究. 中南大学学报(自然科学版), 48(12): 3373-3383.