

肋结构对锚杆导波传播特性的影响及缺陷检测*

万 翔^{1,2}, 段 凯^{1,2}, 黄利平^{1,2}, 陈 渊^{1,2}, 张旭辉^{1,2}, 曹现刚^{1,2}

(1. 西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

(2. 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室 西安, 710054)

摘要 针对目前基于超声导波的锚杆检测方法大多忽略锚杆表面肋结构影响的问题, 研究肋结构影响下超声导波在锚杆中的传播特性, 并提出一种基于能量比指标的锚杆缺陷检测方法。首先, 利用半解析有限元方法研究肋结构对锚杆频散特性的影响, 发现肋结构会使检测模式 $L(0,1)$ 的群速度值略微减小; 其次, 研究肋结构对锚杆中超声导波传播特性的影响, 发现肋结构会产生均匀的反射波, 当缺陷较小时, 缺陷的反射波容易被肋结构的反射波所淹没; 然后, 提出基于能量比指标的锚杆小缺陷检测方法; 最后, 基于仿真和实验的方法, 采用能量比指标对锚杆进行检测。研究结果表明, 超声导波的能量比指标能够明显分辨出正常以及深度为 1 mm 和 2 mm 的缺陷。这说明在肋结构影响下, 基于超声导波能量比指标的锚杆缺陷检测方法是可行、有效的, 为锚杆检测提供了一种新的方法和思路。

关键词 超声导波; 锚杆检测; 肋结构响应; 能量比指标

中图分类号 TH17

引 言

锚杆结构是最为主要的加固构件, 其在制造、施工和服役等过程中, 不可避免地产生缺陷, 成为工程建设的安全隐患。因此, 对锚杆的检测已经成为专家学者需解决的一个重要课题^[1-4]。

传统的锚杆结构检测方法有抗拉拔实验和取芯法。这 2 种方法都是破坏性检测方法, 不能准确判断锚杆是否有损伤。因此, 因锚杆缺陷引起支护问题出现的坍塌事故时有发生。传统的有损检测方法正在被无损检测方法取代^[5]。

超声导波^[6]具有传播距离远、能量衰减小的优势, 在板状^[7]、管状^[8]、杆状^[9]、方管^[10]、铁轨^[11]和钢索^[12-13]等结构中广泛应用。近年来, 超声导波技术开始用于锚杆结构的检测。郭妍钰^[14]基于数值仿真的方法, 以激励中心频率为 1.541 MHz 的超声导波对锚杆中不同深度的环状缺陷进行检测, 发现随着缺陷深度的增加, 缺陷回波的幅值随之显著增加, 而底端回波的幅值随之显著减小。韩世勇^[15]采用实验方法激励中心频率为 2.25 MHz 的超声导波对螺纹钢锚杆进行检测, 发现锚杆表面肋结构对接收回波影响较大, 表现为在时域图上有很多干扰信号, 这些干扰信号掩盖了一些幅值较低的导波模式。以上研

究基于高频超声导波对锚杆进行检测, 高频超声导波存在激励单一模式困难、衰减大和信号处理复杂等问题。Beard 等^[16]认为锚杆表面肋结构对低频段超声导波在锚杆中的传播特性影响不大。研究者利用低频超声导波对锚杆结构进行检测时, 多数忽略锚杆表面均匀分布的肋结构对超声导波传播的影响, 将螺纹钢锚杆简化为表面光滑的圆钢锚杆结构。荣晓洋^[17]利用低频段超声导波技术对锚杆缺陷进行了检测, 发现缺陷反射波幅值与缺陷截面尺寸成线性正比关系, 而底端反射波幅值与缺陷截面尺寸成指数衰减。作者前期的研究表明, 在低频段, 随着激励频率中心频率的增加, 螺纹钢锚杆表面均匀分布的肋结构产生的均匀反射波会越来越明显。锚杆表面肋结构对超声导波传播特性的影响不能忽略。

笔者研究螺纹钢锚杆表面均匀分布的肋结构对超声导波传播特性的影响规律, 针对螺纹钢锚杆表面均匀分布的肋结构产生的均匀反射波会淹没锚杆表面缺陷反射波的问题, 提出了一个简单的能量比指标, 即可实现对螺纹钢锚杆表面缺陷的识别与检测。首先, 利用半解析有限元的方法, 对比圆钢锚杆和螺纹钢锚杆中的频散曲线, 研究肋结构对螺纹钢

* 国家科技重大专项——煤炭重大专项资助项目(2025ZD1700600); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般面上资助项目(2024JC-YBMS-273)

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-08-29

锚杆频散特性的影响,据此选择合适的超声导波检测模态和频率;其次,研究螺纹钢锚杆表面肋结构对超声导波传播特性的影响规律;然后,提出基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法;最后,采用仿真和实验的方法验证所提出方法的有效性。

1 肋结构影响下超声导波在锚杆中的频散曲线

笔者以直径为 20 mm 的圆钢锚杆和螺纹钢锚杆为例进行分析,锚杆材料为碳钢,其弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³。图 1 为锚杆横截面示意图及其尺寸。圆钢锚杆横截面为恒定的圆形,如图 1(a)所示。

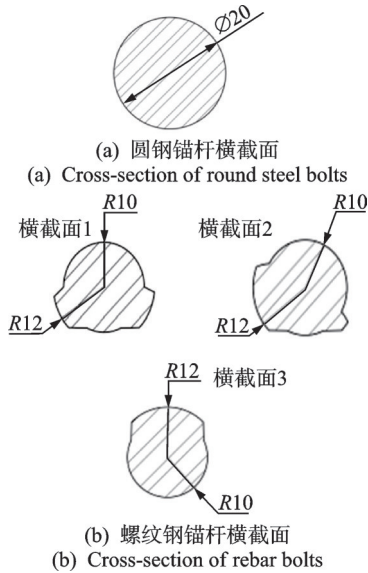


图 1 锚杆横截面示意图及其尺寸 (单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of bolt cross-section (unit: mm)

利用半解析有限元方法计算得到如图 2 所示的圆钢锚杆群速度频散曲线。螺纹钢锚杆表面的肋结构不连续,其横截面形状也不固定,不能直接利用半

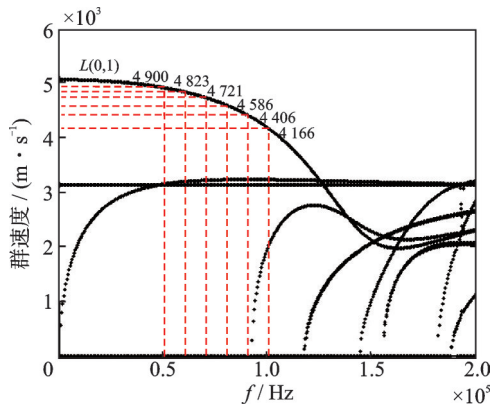
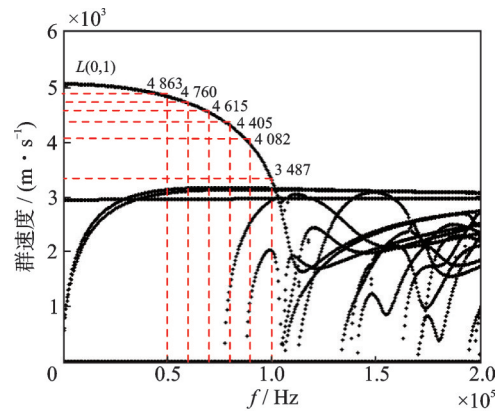


图 2 圆钢锚杆群速度频散曲线

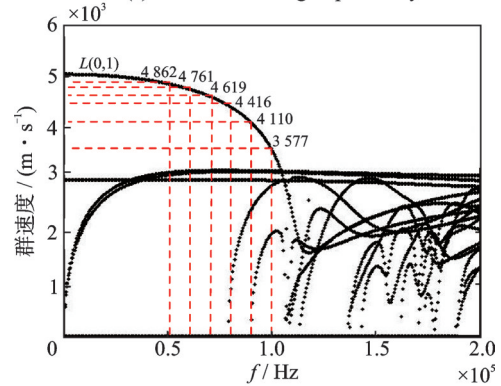
Fig.2 Round steel bolts group velocity

解析有限元方法进行计算。由于肋结构以螺旋线形式分布在螺纹钢锚杆表面,因此螺纹钢锚杆可以看成以螺距为单位的周期结构。轴向长度为一个螺距的螺纹钢锚杆的横截面,如图 1(b)所示的 3 种形状及其轴对称图形。

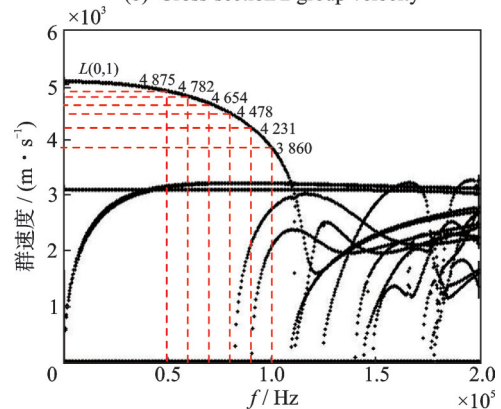
利用半解析有限元方法分别对图 1(b)所示的 3 种形状进行计算,得到如图 3 所示的螺纹钢锚杆群速度曲线。采用半解析有限元法计算时,对横截面三角形网格进行离散处理,网格尺寸为 2 mm。



(a) 横截面 1 群速度曲线
(a) Cross-section 1 group velocity



(b) 横截面 2 群速度曲线
(b) Cross-section 2 group velocity



(c) 横截面 3 群速度曲线
(c) Cross-section 3 group velocity

图 3 螺纹钢锚杆群速度曲线

Fig.3 Rebar bolts group velocity

在频率小于 100 kHz 的范围内,圆钢锚杆和带有肋结构的螺纹钢锚杆 3 种横截面所对应的频散曲线模态基本一致。当频率大于 100 kHz 时,相对于圆钢锚杆,螺纹钢锚杆的模态数量急剧增加,但 3 种横截面对应的频散曲线差异不大。笔者选择 60 kHz~100 kHz 群速度较大的 $L(0,1)$ 作为锚杆的检测模态。

将图 3 中螺纹钢锚杆 3 种横截面形状对应的 $L(0,1)$ 模态群速度的最大值和最小值视为上下区间,得到螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态群速度曲线的范围如图 4 所示。对比图 2 和图 4 可知,相较于圆钢锚杆,表面具有均匀分布肋结构的螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度区域在圆钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度曲线之下,螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度小于圆钢锚杆 $L(0,1)$ 的群速度。

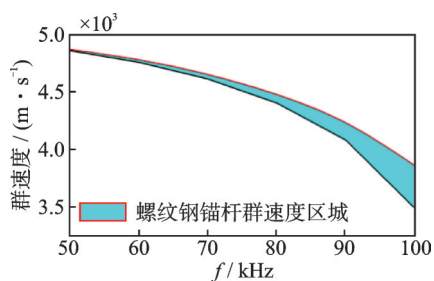


图4 螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态群速度曲线的范围

Fig.4 The range of the velocity curve of the modal group of the rebar bolt $L(0,1)$

2 锚杆检测的仿真与实验设置

2.1 有限元模型

锚杆有限元模型如图 5 所示。锚杆长度 L 为 1 500 mm。图 5(a) 为表面没有肋结构的圆钢锚杆。

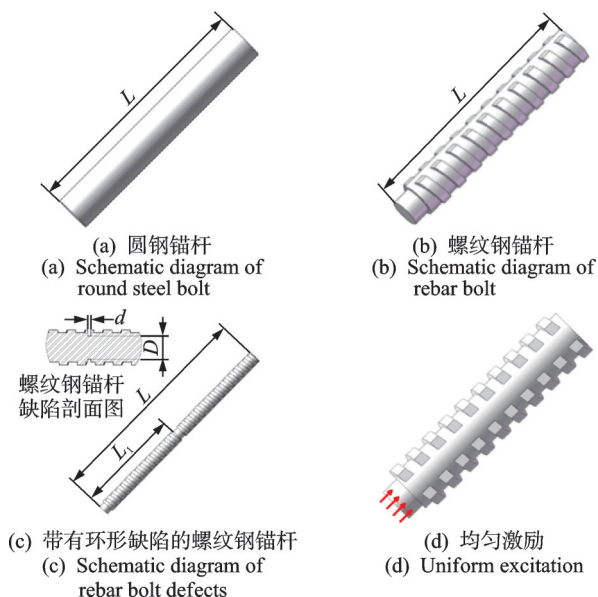


图5 锚杆有限元模型

Fig.5 Schematic diagram of the finite element model

图 5(b) 为表面具有均匀分布肋结构的螺纹钢锚杆,肋结构的螺距为 12 mm、宽度为 5.8 mm、高度为 2 mm。图 5(c) 为带有环形缺陷的螺纹钢锚杆,其中: L_1 为环形缺陷到激励端的距离; d 为缺陷宽度; D 为缺陷处锚杆直径。螺纹钢锚杆以一个端面为基准,磨去杆长为 40 mm 的表面肋结构,使其变为光滑。均匀施加对称激励信号,产生纵向超声导波,如图 5(d) 所示,将锚杆此端称为激励端,另一端称为底面端。采用自发自收的检测方式,信号接收也在激励端,为保证数值计算的精度和收敛性,锚杆结构网格尺寸设置为 2 mm,网格类型为自由四面体网格。

2.2 实验设置

实验平台如图 6 所示,分别由计算机、信号发生器、功率放大器、50 Ω 阻抗终端、转换开关、压电晶片阵列、接收放大器和示波器组成。实验采用自发自收模式。信号发生器产生激励信号,经功率放大器放大之后,由 50 Ω 阻抗终端输出,经转换开关在锚杆中产生超声导波。同时,压电晶片阵列传感器接收反射波,经转换开关被接收放大器中接收,在示波器上呈现时域波形图,经计算机进行储存和分析。

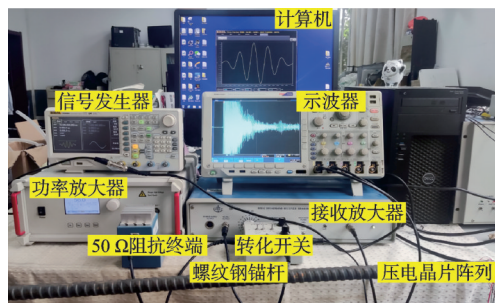


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

压电晶片阵列由 6 个尺寸为 25 mm $\times$ 5 mm $\times$ 0.5 mm 的压电晶片沿锚杆圆周方向均匀布置而成,这种布置方式保证了对称模态的超声导波,同时抑制不需要的弯曲模态。图 7 为具有人工缺陷的螺纹钢锚杆试样。试样有 2 个,缺陷距激励端为 770 mm,缺陷宽度为 2 mm,2 个试样的缺陷深度分别为 1 mm 和 2 mm。



图7 具有人工缺陷的螺纹钢锚杆试样

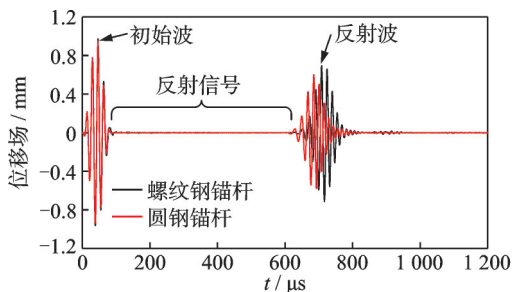
Fig.7 Rebar bolt specimens with artificial defects

3 肋结构影响下超声导波在锚杆中的传播特性

3.1 仿真研究

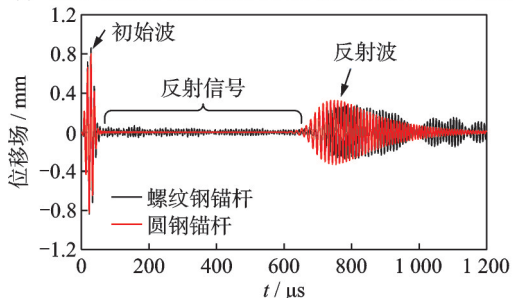
3.1.1 正常锚杆中超声导波的时域波形

基于自发自收的方式对锚杆进行检测,在锚杆激励端施加激励信号,信号接收也在激励端。圆钢锚杆与螺纹钢锚杆的时域波形对比如图8所示。此处将时域波形分为3部分:①初始波,不是笔者关注的信号段;②整个锚杆杆体的反射信号,即初始波和底端面反射波之间的信号段;③超声导波在锚杆底端面的反射波。



(a) 60 kHz激励下的锚杆时域波形

(a) Time-domain waveform of the bolt under 60 kHz excitation



(b) 100 kHz激励下的锚杆时域波形

(b) Time-domain waveform of the bolt under 100 kHz excitation

红色曲线为从表面无肋结构的圆钢锚杆中得到的时域波形;黑色曲线为从表面有肋结构的螺纹钢锚杆中得到的时域波形

图8 圆钢锚杆与螺纹钢锚杆的时域波形对比

Fig.8 Comparison diagram of the time domain of round steel bolt and rebar bolt

从图8可以看出:在60 kHz时,对于圆钢和螺纹钢锚杆在反射信号段内都没有明显的信号产生;在100 kHz时,螺纹钢锚杆在反射信号段出现明显的时域波形,该时域波形是由螺纹钢锚杆表面均匀分布的肋结构产生的均匀反射造成的;相对于60 kHz,底端面反射波在100 kHz时的波包变得更宽,频散现象更加明显;不论是60 kHz还是100 kHz,圆钢锚杆中的底端面反射波波包稍微提前于螺纹钢锚杆中的底断面反射波波包,圆钢锚杆中的底端面反射波波包的群速度略大于螺纹钢锚杆中的底断面

反射波波包的群速度。

3.1.2 肋结构对 $L(0,1)$ 模态群速度影响的仿真验证

在60 kHz~100 kHz频率范围内,分别对圆钢锚杆和螺纹钢锚杆进行检测。根据获得的时域波形,分别计算 $L(0,1)$ 模态导波在圆钢和螺纹钢锚杆中的群速度。有限元仿真计算圆钢和螺纹钢锚杆的群速度如图9所示。可见,圆钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度与利用半解析有限元方法计算得到的 $L(0,1)$ 模态的群速度结果一致,螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度基本在利用半解析有限元方法计算的 $L(0,1)$ 模态的群速度区域内。

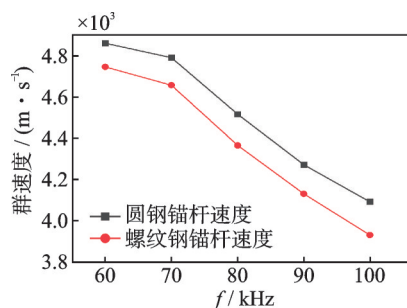


图9 有限元仿真计算圆钢和螺纹钢锚杆的群速度

Fig.9 Finite element simulation to calculate the group velocity of round and rebar bolts

圆钢锚杆和螺纹钢锚杆中 $L(0,1)$ 模态的群速度在60 kHz~100 kHz范围内,随着频率的增加呈逐渐减小的趋势,与利用半解析有限元方法计算的结果相一致。在同一频率下,表面具有肋结构的螺纹钢锚杆中 $L(0,1)$ 模态的群速度小于表面没有肋结构的圆钢锚杆中 $L(0,1)$ 模态的群速度。

3.1.3 肋结构引起的均匀反射波随频率变化趋势

螺纹钢锚杆表面均匀分布的肋结构会产生均匀的反射波,见图8中的反射信号段。图10为锚杆表面有、无肋结构的时域波形对比。可以看出:当激励频率为60 kHz时,肋结构引起的反射波的幅值较小;当激励频率为100 kHz时,肋结构引起的反射波的幅值增大很多。

采用能量指标 P 来量化一段时间的超声导波时域信号。假设 x_n 是长度为 N 的离散时域波形,则能量指标 P 表示为

$$P = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (1)$$

锚杆有、无肋结构引起的反射波能量对比如图11所示。可以看出:当激励频率为60 kHz~80 kHz时,锚杆表面肋结构引起的均匀反射波能量较小;当激励频率为90 kHz~100 kHz时,杆表面肋结构引起的均匀反射波急剧增大。

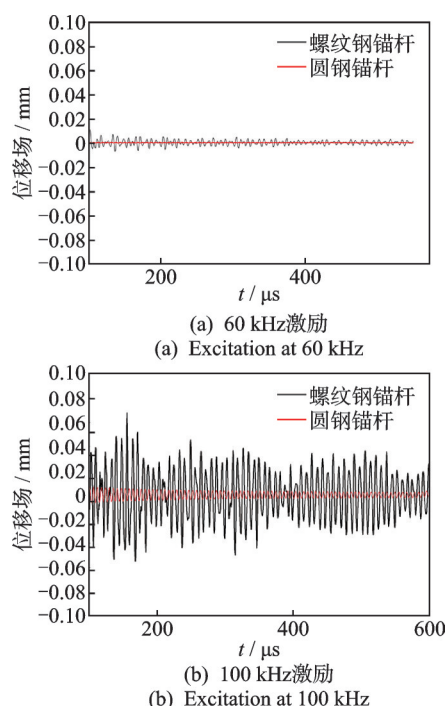


图 10 锚杆表面有、无肋结构的时域波形对比

Fig.10 Comparison of time-domain waveform from bolts with and without ribbed structure

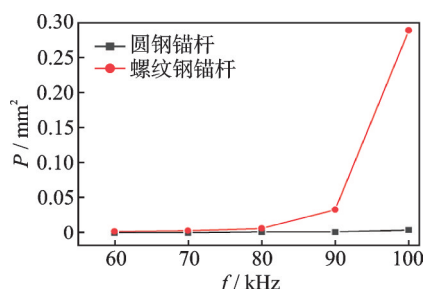


图 11 锚杆有、无肋结构引起反射波能量对比

Fig.11 Comparison of the reflected wave energies from bolts with and without ribbed structure

3.1.4 锚杆表面肋结构对底端面反射波的影响

锚杆底端面的反射波如图 8 中反射波信号段所示。根据式(1)计算圆钢和螺纹钢锚杆底端面反射波的能量。底端面反射波的能量随频率的变化关系如图 12 所示。可以看出,圆钢锚杆底端面反射波的能量随着频率增加,呈现先增加后减小的趋势。当激励频率为 60 kHz~80 kHz 时,底端面反射波能量随着频率的增加而增加;当激励频率为 90 kHz~100 kHz 时,反射波的能量随着频率的增加而减小;当激励频率为 60 kHz~100 kHz 时,螺纹钢锚杆底端面反射波的能量随着频率的增加而减小。这主要是由于肋结构引起的均匀反射波的能量随着频率的增加而增加,造成底端面反射波的能量随着频率的增加而减小。

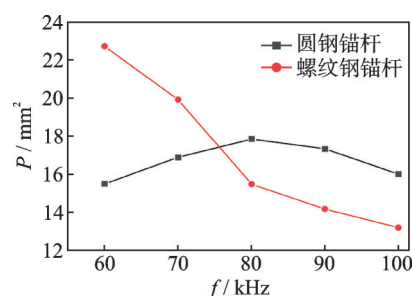


图 12 底端面反射波的能量随频率的变化关系

Fig.12 The variation of the reflected wave energy from the bottom surface with frequency

3.1.5 缺陷锚杆中超声导波的时域波形

设 L_1 为 770 mm, d 为 2 mm, D 分别为 16 mm 和 18 mm, 分别对应缺陷深度为 2 mm 和 1 mm。当激励频率为 100 kHz 时,缺陷锚杆的时域波形图对比如图 13 所示。图 13(a)和图 13(b)分别为缺陷深度

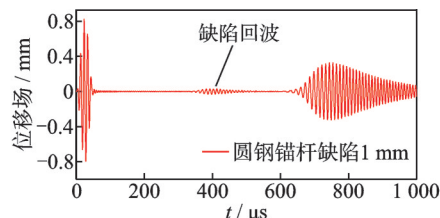
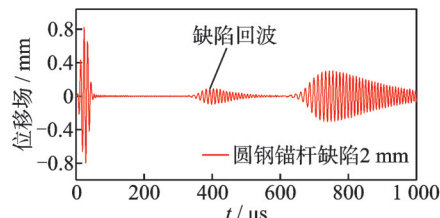
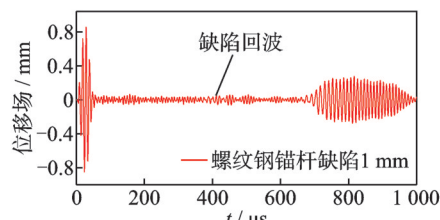
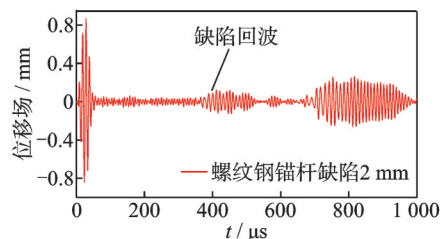
(a) 100 kHz 圆钢锚杆 1 mm 缺陷时域波形
(a) Time-domain waveform of 1 mm defect of 100 kHz round steel bolt(b) 100 kHz 圆钢锚杆 2 mm 缺陷时域波形
(b) Time-domain waveform of 2 mm defect of 100 kHz round steel bolt(c) 100 kHz 螺纹钢锚杆 1 mm 缺陷时域波形
(c) Time-domain waveform of a 1 mm defect in a 100 kHz rebar bolt(d) 100 kHz 螺纹钢锚杆 2 mm 缺陷时域波形
(d) Time-domain waveform of a 2 mm defect in a 100 kHz rebar bolt

图 13 缺陷锚杆的时域波形图对比

Fig.13 Comparison of time-domain waveforms of defective bolts

为 1 mm 和 2 mm 的圆钢锚杆的时域波形图。可以看出,当激励频率为 100 kHz 时,对于圆钢锚杆,无论是深度为 1 mm 还是深度为 2 mm 的缺陷,都能明显看到缺陷反射波的波包,且深度为 2 mm 的缺陷反射波幅值明显大于深度为 1 mm 的缺陷反射波幅值。图 13(c)和图 13(d)分别为缺陷深度为 1 mm 和 2 mm 的螺纹钢锚杆的时域波形图。可以看出,当激励频率为 100 kHz、缺陷深度为 2 mm 时,缺陷反射波的波包不是很明显;当缺陷深度为 1 mm 时,已观察不到缺陷反射波,其被淹没在肋结构的均匀反射波中。

3.2 实验研究

3.2.1 正常螺纹钢锚杆中超声导波的时域波形

同仿真信号类似,实验采集到的正常锚杆中的时域波形如图 14 所示。图 14 显示的是中心频率为 100 kHz 的螺纹钢锚杆检测时域波形,时域波形分成 3 部分:①为初始波;②为螺纹钢表面肋结构引起的均匀反射波信号;③为超声导波在锚杆底端面的反射波。可以看出,肋结构引起的均匀反射波比较明显,同时底端面的反射波波包变宽,有频散现象。

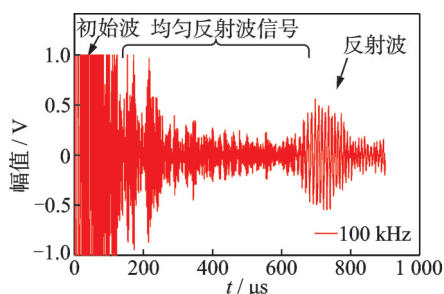


图 14 螺纹钢锚杆 100 kHz 频率下实验时域波形

Fig.14 Time-domain waveform at the excitation frequency of 100 kHz of threaded bolt experiment

3.2.2 缺陷螺纹钢锚杆中超声导波的时域波形

对于缺陷深度分别为 1 mm 和 2 mm 的螺纹钢锚杆试样,施加中心频率为 100 kHz 的激励信号,采集到的不同缺陷大小的螺纹钢锚杆时域波形如图 15 所示。可以看出,深度为 2 mm 的缺陷的反射波包在时域波形图上能够分辨出来,但是已不太清晰;当缺陷深度为 1 mm 时,缺陷反射波包在时域波形上已经很难分辨出来,已经被淹没在肋结构的均匀反射波信号中;缺陷深度为 2 mm 时,底端面的反射波幅值较小;缺陷为 1 mm 时,底端面的反射波幅值较大。

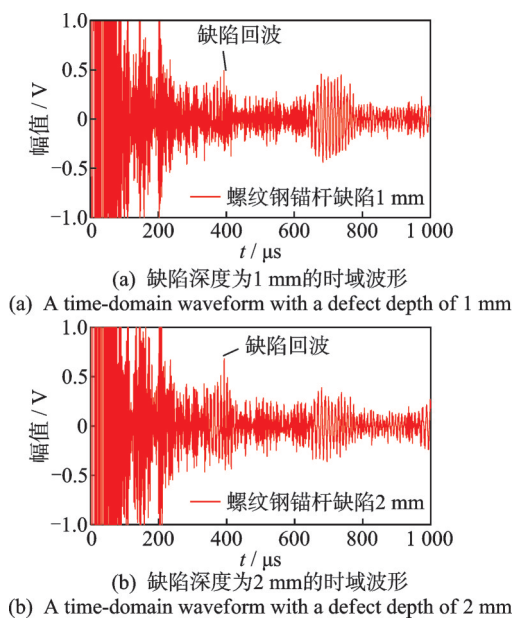


图 15 不同缺陷大小的螺纹钢锚杆时域波形
Fig.15 Time-domain waveform of rebar bolt with different defect sizes

4 基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法

为了解决小缺陷反射波会淹没在肋结构均匀反射波中,造成小缺陷反射波信号难以识别的问题,笔者提出一种基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法。图 16 为能量比指标的计算流程图,具体步骤如下:

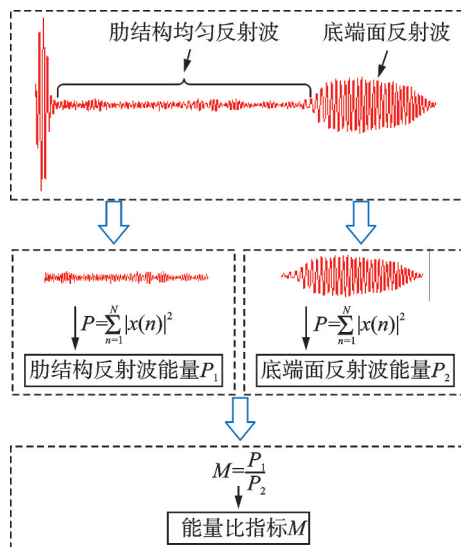


图 16 能量比指标的计算流程图

Fig.16 Flow chart for calculating the energy ratio indicator

- 1) 截取原始信号中肋结构均匀反射波信号和底端面反射波信号;
- 2) 根据式(1),计算肋结构的均匀反射波信号的能量 P_1 ;

3) 根据式(1),计算底端面反射波信号的能量 P_2 ;

4) 根据 $M=P_1/P_2$,计算正常能量比指标 M 。

基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法如下:首先,计算正常螺纹钢锚杆的能量比指标 M_0 ,将其作为基准值;其次,计算待检螺纹钢锚杆的能量比指标 M_1 ;最后,通过比较 M_0 和 M_1 的大小,实现对螺纹钢锚杆缺陷的检测。如果 M_1 明显大于 M_0 ,则表明螺纹钢锚杆中存在缺陷。在检测过程中,如果螺纹钢锚杆中存在缺陷,无论缺陷大小,缺陷处都会产生发射波,缺陷反射波会与肋结构的均匀发射波相叠加,造成肋结构反射波信号段的能量 P_1 增大;同时缺陷处产生反射波,造成透射波能量减小,从而使底端面反射波能量值 P_2 减小。由于 P_1 增大和 P_2 减小都会使能量比指标 M_1 增大,因此相对于正常能量比指标 M_0 ,待检测螺纹钢锚杆的能量比指标 M_1 增大,表明螺纹钢锚杆中存在缺陷。

5 基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法的验证

对于正常、缺陷深度分别为1 mm和2 mm的3种螺纹钢锚杆试样,从仿真和实验的角度,在60 kHz~100 kHz的频率范围内进行检测,并计算响应的能量比指标。螺纹钢锚杆试样的能量比指标如图17所示。可以看出:正常螺纹钢锚杆试样的能

量比指标值最小,缺陷深度为2 mm的螺纹钢锚杆试样的能量比指标值最大,缺陷深度为1 mm的螺纹钢锚杆试样的能量比指标值介于两者之间;随着缺陷深度的增加,能量比指标也增大。基于能量比指标,可以实现螺纹钢锚杆中小缺陷的检测与识别。

6 结 论

1) 在频率小于100 kHz的范围内,圆钢锚杆和带有肋结构螺纹钢锚杆中的超声导波模态数量基本一致,当频率大于100 kHz时,螺纹钢锚杆中超声导波的模态数量急剧增加;在60 kHz~100 kHz范围内,表面具有均匀分布肋结构的螺纹钢锚杆 $L(0,1)$ 模态群速度值略小于没有肋结构的圆钢锚杆 $L(0,1)$ 模态的群速度值。

2) 肋结构的存在会产生均匀的反射波,而且当 $L(0,1)$ 作为检测模态时,在60 kHz~100 kHz范围内,肋结构的均匀反射波能量会随着频率的增加而增大。

3) 提出了基于能量指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法,有效解决了肋结构均匀反射波淹没缺陷反射波、造成小缺陷无法检测的难题,能够实现螺纹钢锚杆中缺陷的有效检测与识别。

4) 通过仿真和实验的方法验证了基于能量比指标的螺纹钢锚杆缺陷检测方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] XU F, WANG K, WANG S G, et al. Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 264-274.
- [2] TONDOLO F. Bond behaviour with reinforcement corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 926-932.
- [3] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1976-1985.
YOU Chun'an, ZHAN Yubao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1976-1985. (in Chinese)
- [4] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新. 深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 312-332.
LIU Quansheng, LEI Guangfeng, PENG Xingxin. Ad-

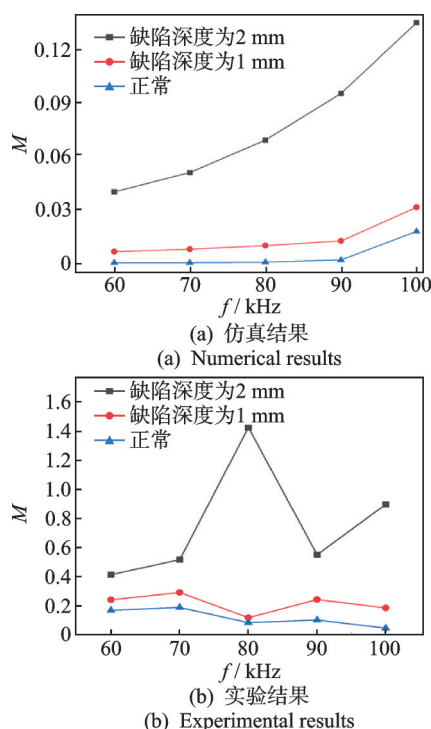


图17 螺纹钢锚杆试样的能量比指标

Fig.17 Energy ratio index of rebar bolt specimen

- vance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 312-332.(in Chinese)
- [5] 刘磊磊, 朱骏, 张绍和, 等. 基于 ICEEMDAN 的锚杆锚固缺陷超声导波无损检测[J/OL]. 地球科学, 2022: 1-17 (2022-04-14) [2025-10-09]. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.102>.
- LIU Leilei, ZHU Jun, ZHANG Shaohe, et al. Non-destructive Detection of anchor defects using ultrasonic guided wave and ICEEMDAN method[J/OL]. Earth Science, 2022: 1-17 (2022-04-14) [2025-10-09]. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.102>. (in Chinese)
- [6] 王彬文, 吕帅帅, 杨宇. 基于能量图谱和孪生网络的导波损伤诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 182-189, 208.
- WANG Binwen, LÜ Shuaishuai, YANG Yu. Guided-wave based damage diagnosing method with energy spectrum and siamese network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 182-189, 208.(in Chinese)
- [7] 刘小峰, 王邦昕, 柏林. 基于超声导波 SC-DTW 的金属板微损检测方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2619-2626.
- LIU Xiaofeng, WANG Bangxin, BO Lin. Detection of micro-damage in metal plates based on SC-DTW of guided waves[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2619-2626.(in Chinese)
- [8] 王国锋, 李富才, 刘志强, 等. 超声导波在圆管结构损伤定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 440-448, 623.
- WANG Guofeng, LI Fucui, LIU Zhiqiang, et al. Research on ultrasonic guided wave-based damage localization for pipeline structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 440-448, 623.(in Chinese)
- [9] LI G, ZHANG J, CHENG J K, et al. Multi-Order mode excitation and separation of ultrasonic guided waves in rod structures using 2D-FFT [J]. Sensors, 2023, 23(20): 8483.
- [10] 刘美茹, 万翔, 张旭辉, 等. 方管中超声导波的传播特性及缺陷检测[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(1): 143-151.
- LIU Meiru, WAN Xiang, ZHANG Xuhui, et al. Propagation characteristics of ultrasonic guided waves in square tubes and its application to the detection of defects[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(1): 143-151. (in Chinese)
- [11] RAMATLO D A, LONG C S, LOVEDAY P W, et al. Physics-based modelling and simulation of reverberating reflections in ultrasonic guided wave inspections applied to welded rail tracks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 530: 116914.
- [12] 陈鑫, 朱劲松, 钱骥, 等. 基于导波多尺度能量熵的钢绞线张力识别[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 745-750.
- CHEN Xin, ZHU Jinsong, QIAN Ji, et al. Steel strands tension identification using multi-scale energy entropy of ultrasonic guided waves[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(4): 745-750. (in Chinese)
- [13] ZHANG L G, JIA J F, BAI Y L, et al. Pre-stress evaluation for steel strand based on energy leakage ratio of ultrasonic guided wave[J]. Measurement, 2024, 233: 114757.
- [14] 郭妍钰. 高频导波检测锚杆锚固质量方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [15] 韩世勇. 导波在锚杆锚固质量检测中的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [16] BEARD M D, LOWE M J S, CAWLEY P. Development of a guided wave inspection technique for rock bolts[C]//AIP Conference Proceedings. [S.l.]: AIP, 2002: 1318-1325.
- [17] 荣晓洋. 超声纵向导波在锚杆中的传播特性及典型缺陷检测研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.



第一作者简介: 万翔, 男, 1981 年 4 月生, 博士、讲师、硕士生导师。主要研究方向为超声导波无损检测。曾发表《The use of ultrasonic guided waves for the inspection of square tube structures: dispersion analysis and numerical and experimental studies》(《Structural Health Monitoring》2021, Vol.20, No.1) 等论文。
E-mail: wx@xust.edu.cn