



移动扫码阅读

郭妍钰, 张昌锁, 张 玥. 高频导波检测锚固锚杆缺陷数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 35-44.  
GUO Yanyu, ZHANG Changsuo, ZHANG Yue. Numerical simulation of high frequency guided wave testing for anchor bolt defects[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 35-44.

## 高频导波检测锚固锚杆缺陷数值模拟研究

郭妍钰, 张昌锁, 张 玥

(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:**前期研究证实对于地下工程中广泛使用的锚固锚杆结构只有大于 1 MHz 的高频导波具有衰减最小的检测模态,但由于高频导波数值模拟复杂性其研究结果均集中于试验测试,这就使得对高频导波传播特性的研究十分受限。为探究高频导波传播规律并能将其应用于现场锚固质量的检测,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件通过参数优化实现了锚固锚杆数值模型的建立。通过分析不同锚固体厚度对波形的影响得到了能用数值模拟有限尺寸模型代替现场无限锚固厚度尺寸模型的最小外径;理论上导波主要沿钢杆内部向前传播,且锚杆径向体现波导结构形状,因此采用锚杆径向网格设置最密,锚固体径向与杆体轴向网格设置相对稀疏的方法实现了单元数目最小化;鉴于不同首波宽度的导波频散特性不同,对其在无缺陷及带缺陷锚杆中的传播过程进行研究,得到最优首波宽度为 0.04 ms;基于上述优化后的 3 个参数分别建立完整锚固锚杆与带缺陷锚固锚杆数值模型,数值计算结果与文献中实验室测试结果高度吻合,证明所建立数值模型正确有效,真正实现了有限计算资源下高频导波在锚固锚杆传播应用中的准确模拟。在此基础上搭建含不同缺陷特征的锚固锚杆模型,对缺陷位置及深度进行研究,结果表明特定频率的高频导波能够对钢杆缺陷进行精确定位,同时依据缺陷回波幅值与底端回波幅值之比可大致确定缺陷面积。

**关键词:**高频导波;锚固锚杆;无损检测;首波宽度;缺陷定位

中图分类号:TD350;TB559

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)10-0035-10

### Numerical simulation of high frequency guided wave testing for anchor bolt defects

GUO Yanyu, ZHANG Changsuo, ZHANG Yue

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Previous research has confirmed that only high-frequency guided waves larger than 1 MHz have the minimum attenuation detection mode for anchor bolt widely used in underground projects. However, due to the complexity of numerical simulation of high-frequency guided waves, the research results are concentrated on experimental testing, which makes the research on propagation characteristics of high-frequency guided waves very limited. In order to explore the propagation of high-frequency guided wave and apply it to the on-site inspection of anchorage quality, the numerical model of anchor bolt is established by using ANSYS/LS-DYNA finite element software through parameter optimization. By analyzing the influence of different anchor thickness on the wave shape, the minimum outer diameter that can replace the field infinite anchor thickness model with the numerical simulation finite size model is obtained; In theory, the guided wave mainly propagates forward along the interior of the steel rod, and the bolt radial reflects the waveguide structure shape. Therefore, the bolt radial grid is set the densest, and the anchor body radial grid and the bar axial grid are set relatively sparse, in order to minimize the number of elements; In view of the different dispersion characteristics of guided waves with different head wave widths, the propagation process of guided waves in non-defective and defective bolts was studied, and the optimal head wave width was 0.04 ms;

收稿日期:2022-08-26 责任编辑:常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1387

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774054)

作者简介:郭妍钰(1998—),女,山西忻州人,硕士研究生。E-mail: 1134172106@qq.com

通讯作者:张昌锁(1968—),男,山西原平人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zhangchangsuo@tyut.edu.cn

Based on the above three optimized parameters, the numerical models of the complete anchor bolt and the anchor bolt with defects are established respectively. The numerical simulation results are highly consistent with the laboratory test results in the literature, which proves that the numerical model established is correct and effective, and truly realizes the accurate simulation of high-frequency guided waves in the propagation application of the anchor bolt under the limited computing resources. On this basis, the anchor bolt model with different defect characteristics is built, and the defect location and depth are studied. The results show that the high frequency guided wave with specific frequency can accurately locate the steel rod defects, and the defect area can be roughly determined according to the ratio of defect echo amplitude to bottom echo amplitude.

**Key words:** high frequency guided wave; anchor bolt; non-destructive testing; first wave width; defect location

## 0 引言

锚杆支护因具有高效安全且经济效益良好的特点被广泛应用于诸多工程,但同时由于锚杆施工的复杂性与隐蔽性通常会造成锚杆有效长度不够和锚固质量差等问题。传统的检测方法因具有破坏性及偶然性而逐渐被淘汰,新兴的锚杆无损检测法以其无损、高效、快速的特点越来越成为锚杆锚固质量检测的主要方法<sup>[1-3]</sup>。

在激发波为低频导波条件下,多位学者对锚杆锚固质量的评价进行了研究。汪明武等<sup>[4]</sup>、ZOU等<sup>[5]</sup>通过室内与现场试验证明应力波可对锚杆锚固长度进行检测,李义等<sup>[3,6]</sup>、CUI等<sup>[7]</sup>、YU等<sup>[8]</sup>分别提出可粗评锚固质量与锚固力的参数以及可评价锚杆注浆率的指标。吴斌<sup>[9-10]</sup>、何存富等<sup>[11-12]</sup>用人工设置缺陷的方法对自由钢杆及弯管进行室内试验,结果表明所选频率可以对缺陷进行较为准确的定位。同时,相关数值模拟结果与试验结果均较为贴合,能够对锚杆所设置缺陷<sup>[9,12-13]</sup>进行定位。

上述试验及模拟选取的激发波均为低频导波,然而现有研究表明,在现场试验中低频导波由于衰减严重导致底端反射不易识别甚至接收不到底端回波<sup>[14-15]</sup>,因此基于低频导波进行的室内试验及数值模拟就失去了一定的指导意义。基于此也有许多学者将研究方向转向高频导波传播特性的研究。

何存富等<sup>[16]</sup>、吴斌等<sup>[17]</sup>对1 MHz以上高频导波的研究表明确实存在衰减小传播距离远的高频纵向导波可以用来进行锚杆锚固长度与缺陷位置的检测。余海军等<sup>[18-19]</sup>将高频导波应用于现场管道质量检测,证明高频导波在现场检测中的可靠性。本课题组学者<sup>[20-23]</sup>也利用不同范围内高频导波对锚杆有效长度和锚固质量与波形关系进行了探究。但高频导波的相关数值模拟仍鲜有报道,曾杰等<sup>[24]</sup>采用波结构加载的方法尝试激发单一模态的高频导波,但模拟结果并不理想。张玥等<sup>[25]</sup>实现了高频导波在自由钢杆中的数值模拟,为高频导波在锚固锚杆中传播特性

的研究提供了思路。

高频导波数值模拟难以实现主要有以下几点原因:首先,随着导波频率升高,其模态更加复杂,难以激发单一模态导波,同时由于其频散性,对于接收到的波形图很难确定目标模态。其次,现场检测模型为无限大锚固体,在数值模拟有限锚固厚度的条件下如何得到能够应用于现场检测的规律也十分重要;此外,高频导波波长更短,为满足计算精度要求需设置更加细密的单元网格,因此需要解决庞大计算量的问题。

笔者采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件进行数值模拟。以全长黏结型锚固锚杆为研究对象,选取高频纵向模态导波为激发波,通过对不同锚固厚度及单元网格密度的研究实现了高频导波在锚固锚杆中传播的准确模拟。并对不同首波宽度下波形进行分析,得到较为合适的激发波宽度。基于此建立带缺陷锚固锚杆数值模型,分别对不同缺陷位置及缺陷深度下高频导波传播特性进行了研究,找到一种采用高频导波检测锚杆锚固质量的方法。

## 1 高频导波数值模型的建立

### 1.1 激发波频率的确定

锚固锚杆在理论计算中可视为锚杆、锚固介质与无限大真空组成的3层介质模型<sup>[26]</sup>,如图1所示。依据其材料参数、几何参数以及边界上力与位移条件可对频散方程进行求解。试验所选模型的材料参数见表1。不同的激发波频率在波导结构中传播速度及衰减特性均不同,因此需要依托求解所得频散曲线指导试验选取低衰减传播远的高频导波。

图2为长度1 m,直径22 mm的锚固锚杆结构求解所得衰减频散曲线与能量速度频散曲线<sup>[17]</sup>。由图2a可得在锚固体无限大的条件下,低频范围内导波衰减严重,这也是现场试验用低频导波进行检测时很难接收到底端回波的原因。而在高频范围内(大于1 MHz)确实存在衰减在20 dB/m以下(图中虚线所示)能够传播较远距离的导波。同时图2a

衰减频散曲线上的衰减极小值点所对应的模态(如图中A点所示)也是图2b速度频散曲线上传播速度最快的模态(图中B点所示)。因此目标模态导波能够最先到达锚杆顶端,这就有利于目标波包的识别,进行信号的有效提取。同时在进行数值模拟时为模型设置材料阻尼,能够削弱非目标模态波包传播能力,使得所接收到目标模态波包更为清晰。结合这两种方法,就能够解决高频导波难以确定目标模态的难点。

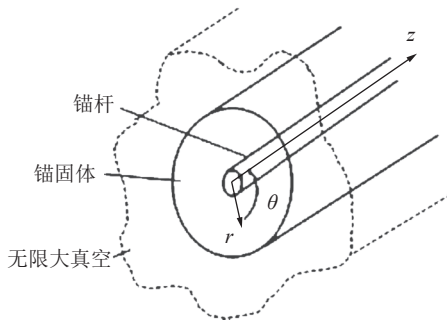


图1 锚固锚杆理论模型示意

Fig.1 Schematic of theoretical model of anchor bolt

表1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

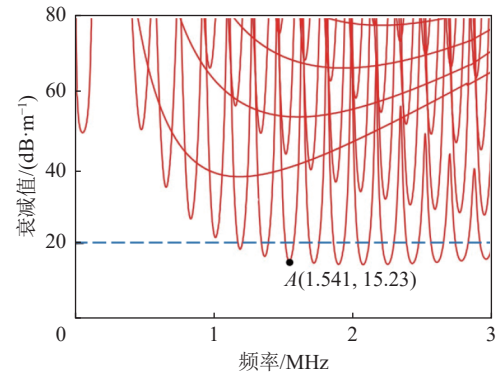
材料	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	纵波衰减 $\eta_L/(\text{Np}\cdot\text{wt}^{-1})$	横波衰减 $\eta_T/(\text{Np}\cdot\text{wt}^{-1})$
钢杆	0.30	7 930	210	0.003	0.008
水泥	0.20	1 600	20	0.043	0.100

试验激发波依据图2a衰减频散曲线选取频率为1.541 MHz的高频导波,其衰减值为15.23 dB/m,能够在锚固锚杆中传播较远距离。

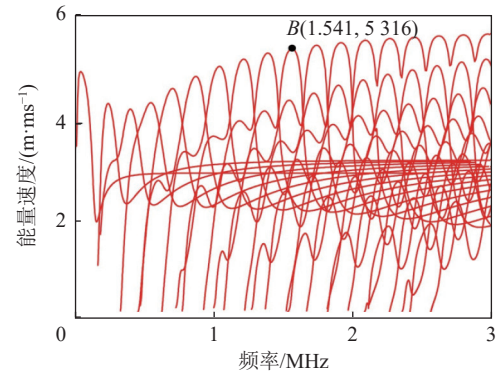
## 1.2 锚固厚度的确定

数值模型的建立需要与现场试验模型尽可能一致。锚杆与锚固体在分界面处应力与位移均连续,故数值模型采用共节点的连接方式进行建模。现场试验锚固锚杆通常为无限锚固厚度,而室内试验与数值模拟受条件限制并不能建立无限锚固厚度模型,那么在有限锚固厚度条件下所得到的相关结论是否同样适用于无限锚固厚度模型就有待商榷,因此,需要进行锚固厚度对高频导波在锚固锚杆中传播波形影响的研究。

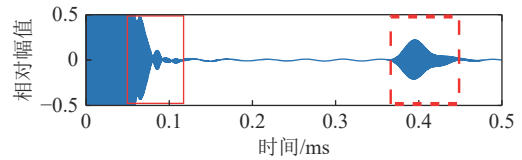
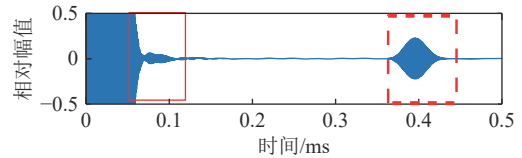
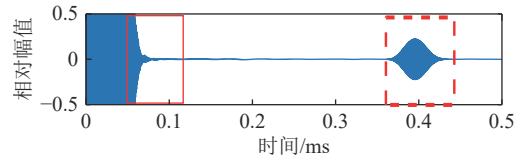
建立锚杆长度为1 m,直径22 mm,锚固体外径分别为0.1、0.2和0.4 m的数值模型。选取首波宽度为0.04 ms的1.541 MHz导波作为激发波,图3为锚固体不同外径波形图,波包1为侧面回波,波包2为底端回波。



(a) 衰减频散曲线



(b) 能量速度频散曲线

图2 锚固锚杆的频散曲线<sup>[17]</sup>Fig.2 Dispersion curve of anchor bolt<sup>[17]</sup>(a)  $D=0.1$  m(b)  $D=0.2$  m(c)  $D=0.4$  m

□ 波包1    ▤ 波包2

图3 锚固体不同外径波形

Fig.3 Waveform of different outer diameters of anchor body

观察图3a,当锚固体外径为0.1 m时,侧面回波明显,且接收到底端回波频散严重,波包宽度从0.04 ms增加到了0.1 ms,波包幅值为0.204,计算所得导波传播速度为5 376 m/s。底端回波频散严重的原因因为锚

固体外径尺寸较小,使得侧面回波与沿锚杆轴向传播波包相叠加,造成波包的拉长现象。锚固体外径为0.2 m和0.4 m时接收到底端回波的波包宽度均为0.05 ms,排除导波传播的正常频散,可以认为所接收到底端回波是完整的。两者计算所得导波传播速度均为5 333 m/s,波包幅值分别为0.219与0.223,相差很小。由图2b可得1.541 MHz导波传播速度为5 316 m/s,无论从波包完整性还是传播速度吻合程度来看0.2 m与0.4 m的锚固体外径都与实际更为契合。在能得到同样精度结果的条件下,外径厚度为0.2 m与0.4 m的模型单元数目分别为210万与340万,计算时长分别为14 h与40 h,因此在模拟过程中选择0.2 m的外径尺寸,能够满足模拟精度要求,与导波在现场传播速度贴合,同时大大节约计算资源。

### 1.3 网格密度的确定

文中主要对导波的纵向模态高频范围进行研究,模拟中采用的都是大于1 MHz的高频导波,其波长较短,前人研究所得一个波长内8~20个单元数目的网格密度不能满足模拟要求<sup>[27-28]</sup>,为保证可以接收到清晰的缺陷回波与底端回波,就需要采取更加细密的网格划分,如同样尺寸的锚固锚杆模型,在激发波为低频导波条件下只需要几千个单元就可满足计算精度,但激发波为高频导波时,则需要百万甚至千万个单元数目,这就使得计算量十分庞大,求解耗时良久。

为实现高频导波的数值计算,采用以下几种方法对其进行简化。首先,由于模型与加载均有对称性,故采用二维轴对称建模代替三维建模,保证数值计算结果可靠性的同时显著减少了计算量;其次,选择较小的首波宽度,在保证波包能量足够的条件下尽量减少其激发时间,节约计算成本;此外,对锚杆径向、锚固体径向和杆体轴向设置不同的网格密度。在1.541 MHz的激发波频率下不同单元网格密度的波形图如图4所示,其中如120-15-20-15含义为在锚杆径向网格密度设置为一个波长内120个单元,锚固体径向一个波长内20个单元,锚固锚杆轴向一个波长内15个单元。

首先,对锚杆径向、锚固体径向及杆体轴向均设置一个波长内15个单元的网格密度,其波形图如图4a所示,由图中难以观察到明显的底端回波,因此将网格进一步加密,各方向网格密度均设置为一个波长内30个单元,此时的网格数目已达到600多万,但观察图4b依然不能接收到清晰有效的底端回

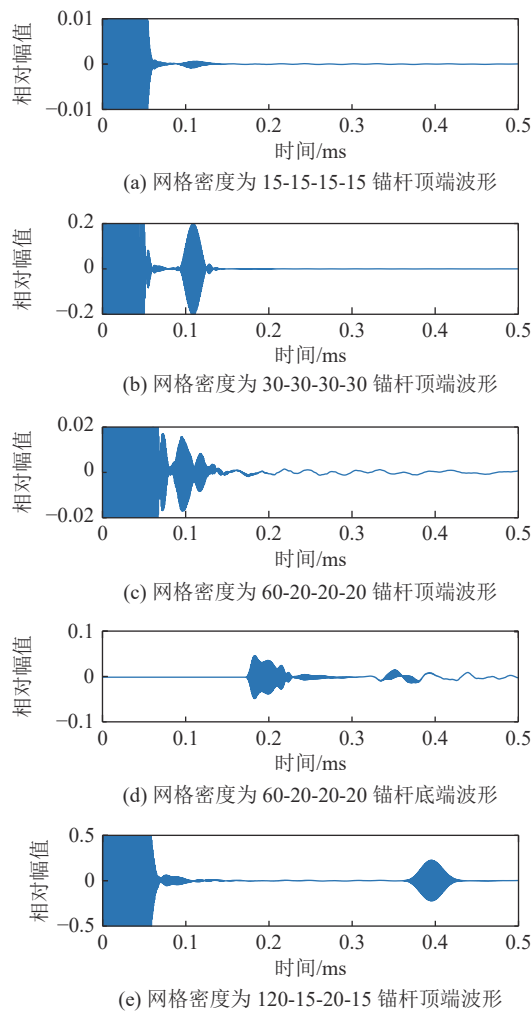


图4 锚固锚杆不同网格密度下波形

Fig.4 Waveform of different grid density of anchor bolt

波,只有0.1 ms处的侧面回波波形明显。若再继续加大网格密度,会使得计算量成倍增加难以运行。在此前研究中,有学者提出对于自由钢杆,在以高频导波为激发波时,锚杆需设置一个波长内60个单元的网格密度才能接收到清晰的底端回波<sup>[25]</sup>。因此将钢杆径向网格密度适当增加,图4c为网格设置为60-20-20-20时顶端波形图。尽管此时锚杆端头不能接收到有效底端回波,但在锚杆底端已能接收到较为完整波形,如图4d所示,说明所选网格变化的趋势是正确的。考虑到导波在锚固锚杆中传播时主要沿着钢杆内部向前传播,有少量能量经透射进入锚固体内部继续传播,因此锚固体径向单元网格密度设置不需太过细密。同时数值模型采用的是沿轴向加载所激发的纵向模态导波进行研究,因此锚杆径向尺寸相较于轴向尺寸对模拟结果影响更大。故而在数值模型进行网格划分时可以将锚杆径向单元网格设置较密,而锚固体径向与杆体轴向设置相对

疏松。经多次模拟调试,单元网格密度设置为 120-15-20-15 时可以满足高频导波在锚固锚杆中传播的模拟精度,其波形图如图 4e 所示。

单元网格密度为 120-15-20-15 时其单元数目与 60-20-20-20 设置相当,同时是网格密度为 30-30-30-30 时的一半,但相较于后两者,其较少的单元网格数目反而能够接收到清晰有效的底端回波。说明所采取的对锚杆径向、锚固体径向及杆体轴向设置不同网格密度的简化方法是有效且正确的,解决了高频导波数值模拟计算量庞大难以实现的难点,真正实现了在有限计算资源下高频导波在锚固锚杆中传播的数值模拟。

#### 1.4 模型正确性验证

建立数值模型,与文献 [17] 中的实验室模型进行比对。模型为 1 m 长的完整锚固锚杆,锚杆直径为 0.02 m,锚固体外径为 0.2 m,其数值模型图如图 5 所示。试验所选激发波频率为 1.541 MHz,以力的方式加载于锚杆端头全部节点;模型网格密度设置为 120-15-20-15。激励信号具体加载位置及网格密度设置情况也在图中标示出。

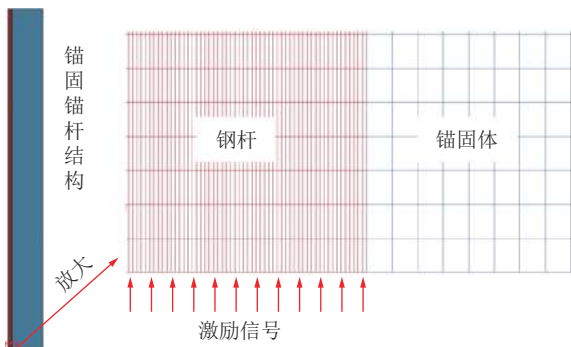


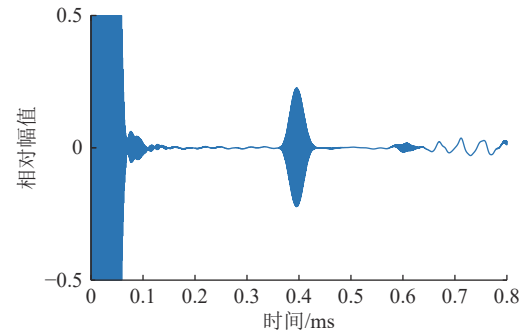
图 5 锚固锚杆数值模型

Fig.5 Numerical model diagram of anchor bolt

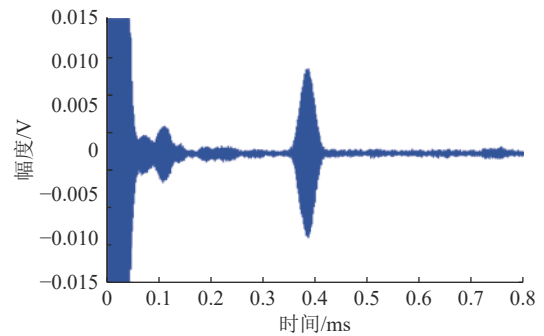
激发波频率为 1.541 MHz 时数值模拟计算结果与实验室结果分别如图 6a, b 所示。因群速度匹配是模型正确的基础,故将数值计算结果与实验室结果由群速度计算所得杆长进行比对,以此来验证模型正确性。

两图比对可得,数值模拟结果与实验室结果基本吻合,均在 0.4 ms 左右接收到清晰的端头回波。由图 2b 能量速度频散曲线得到激发波为 1.541 MHz 时,所对应高阶模态的能量速度为 5 316 m/s,由图 6a 读取接收到底端回波的准确时间为 0.395 ms,激发波峰值为 0.02 ms,将底端回波与激发波峰值之差作为传播时间,由数值模拟结果计算可得杆长为 0.997 m,与实际杆长误差仅为 0.3%。因此可验证所

建立的数值模型能够实现高频导波在锚固锚杆中传播的准确模拟。



(a) 数值模拟结果



(b) 实验室结果

图 6 数值模拟结果与文献 [17] 中试验结果对比

Fig.6 The numerical simulation results and the experimental results in reference [17]

## 2 首波宽度对高频导波传播影响

### 2.1 首波宽度及其频率带宽

无论是室内试验或是现场探测中,都不可能激发理想的单一频率的导波,导波都是以一定的频率带宽向前传播<sup>[20]</sup>。然而不同频率导波在波导结构中对不同传播速度,这就导致所接收到波包由于导波的频散特性会出现形状拉长,能量不够集中的现象。因此激发波的首波带宽对波形起着决定性的作用。图 7 为 1.541 MHz 的激发波在 0.2 ms, 0.04 ms 和 0.02 ms 首波宽度下的时谱图及经过 FFT 变换后的归一化频谱图。

由图中可以看到首波宽度为 0.2 ms 时频率带宽为 0.035 MHz,首波宽度为 0.04 ms 与 0.02 ms 时频率带宽分别为 0.07 MHz 和 0.2 MHz,可见不同的首波宽度确实对频率带宽有显著影响,导波频散特性随频率带宽的增加而表现明显,为获得清晰有效的回波,有必要探究其在锚固锚杆中不同的传播特性。

### 2.2 不同首波宽度在完整锚固锚杆中传播情况

建立长度为 0.5 m 的锚固锚杆的数值模型,材料参数同表 1。不同首波宽度对应的波形图分别如图 8

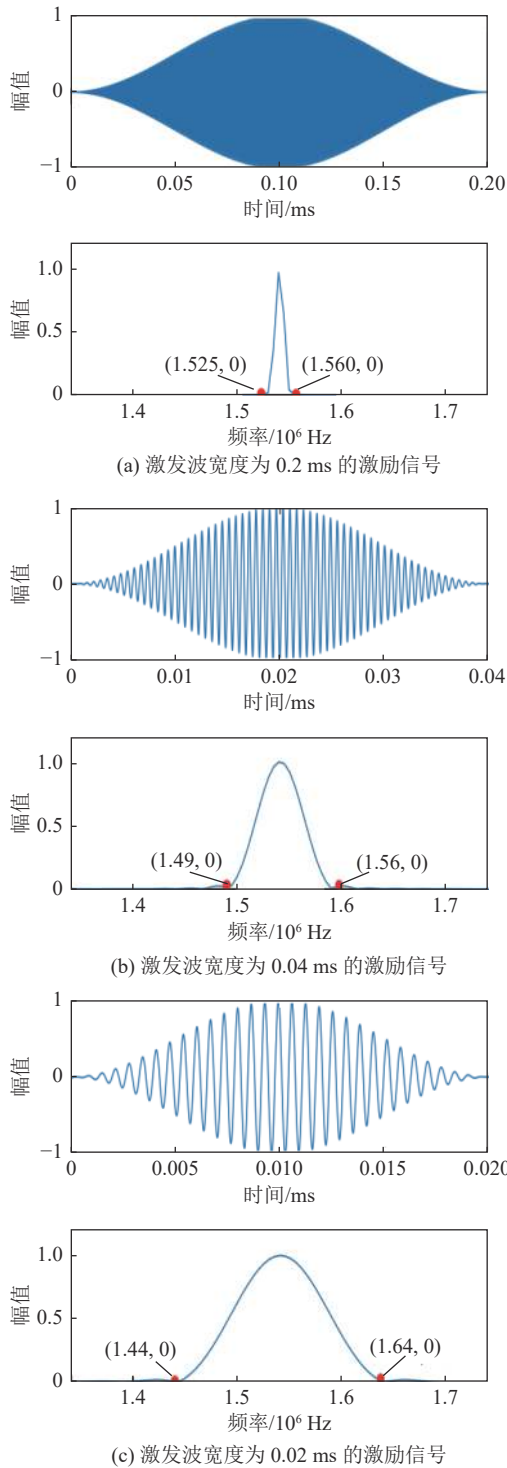


图7 激发波为1.541 MHz的不同首波宽度下时域及频域  
Fig.7 Time domain and frequency domain diagrams corresponding to different first wave widths with 1.541 MHz excitation wave

所示。由图中可明显看到,各首波宽度下波形图均可接收到两个明显的底端回波,其中波包1为第1次底端回波,波包2为第2次底端回波。当激发波宽度为0.2 ms时,波包拉长现象较严重,两波包未分离;激发波宽度为0.02 ms时,波包频散较为严重,所

接收到底端回波不够完整;激发波宽度为0.04 ms时,所接收到底端回波相对独立且清晰完整,中间的小波包为侧面回波,对底端回波不造成影响,满足模拟所需精度要求,且相较于0.2 ms的激发波宽度可大大节约计算时间。

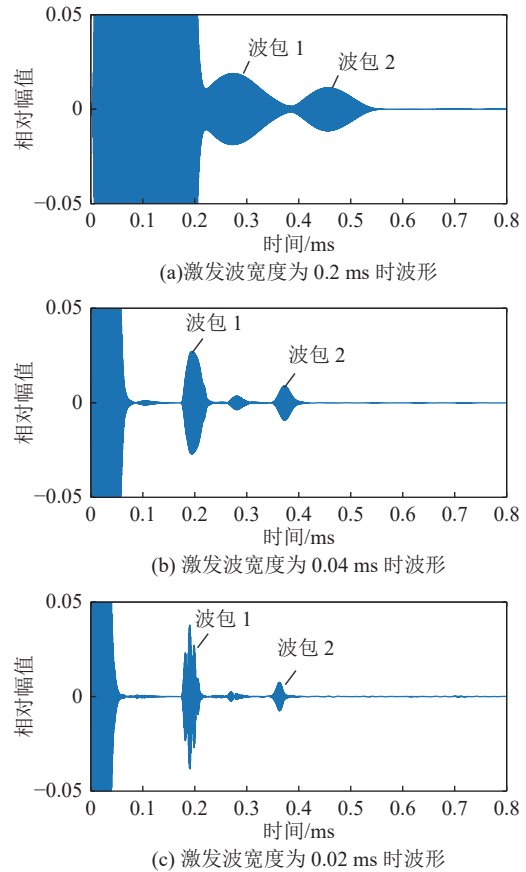


图8 激发波频率为1.541 MHz时不同首波宽度下数值模拟结果

Fig.8 Numerical simulation results under different excitation wave widths when the excitation wave frequency is 1.541 MHz

### 2.3 不同首波宽度在带缺陷锚固锚杆中传播情况

对于完整锚固锚杆,较宽或较窄的首波宽度均能接收到清晰的底端回波。但对于带缺陷的锚固锚杆,首波宽度的选择对波形影响更为关键。建立长度为0.5 m的锚固锚杆,在距离端头0.35 m处设置一深度为2 mm,宽度为4 mm的缺陷,激发波频率选为1.541 MHz,不同首波宽度下波形图如图9所示。

观察图9可知首波宽度为0.2 ms时带缺陷的锚固锚杆波形图可观察到2个波包,分别为1次与2次底端回波。由于缺陷回波与底端回波的叠加使得波包1幅值有相应增加,但两波包融合在一起使得缺陷位置不能识别。首波宽度为0.02 ms时也可观察到2个明显波包,波包1为缺陷回波,波包2为底端回波,但较大的频率带宽使得小波包有分离现象,

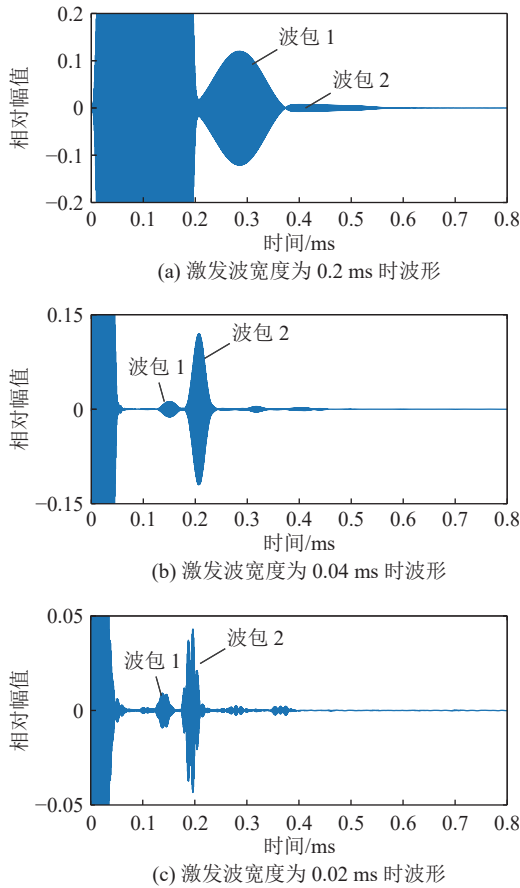


图 9 首波宽度为 0.2 ms 时带缺陷锚固锚杆波形

Fig.9 Waveform of anchor bolt with defect when the first wave width is 0.2 ms

在选点时易引起误差。但 0.04 ms 的首波宽度则可接收到清晰完整的缺陷回波与底端回波。

综上，首波宽度过大容易造成波形叠加难以区分且计算时间长的问题，但首波宽度过小也会使得频散严重，波形难以识别。因此，选取一个合适的激发波宽度十分重要。在经过多次数值模拟调试后，发现 0.04 ms 的首波宽度可以基本满足模拟要求，波形清晰且波包有足够的能量向前传播。本文后续模拟均采用 0.04 ms 的首波宽度。

### 3 高频导波在带钢筋腐蚀缺陷锚固锚杆中传播的数值模拟

#### 3.1 数值模型建立及正确性验证

采用文献 [17] 中的实验室模型与数值模拟结果比对验证带缺陷锚固锚杆模型的正确性。实验室模型是钢杆直径为 22 mm，长度为 1 m 的锚固锚杆，在距离钢杆端头 0.75 m 处设置一个缺陷，材料参数见表 1。激发波频率为 2.43 MHz 的高频导波，所得波形图如图 10a 所示。

建立带缺陷锚固锚杆数值模型，模型加载方式、

网格划分、首波宽度等设置与前文保持一致。带缺陷锚固锚杆数值模型及缺陷处网格划分如图 11 所示。

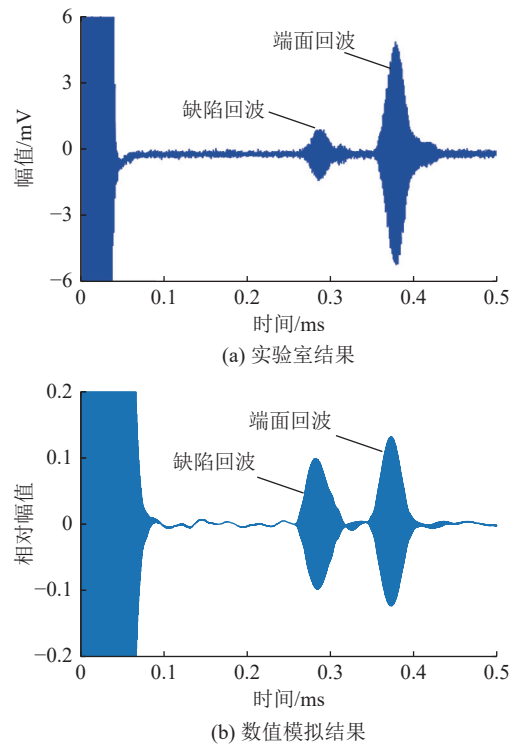


图 10 频率为 2.43 MHz 的激发波在带缺陷锚固锚杆中传播的波形<sup>[17]</sup>

Fig.10 Waveform of excitation wave with frequency of 2.43 MHz propagating in anchor bolt with defect<sup>[17]</sup>

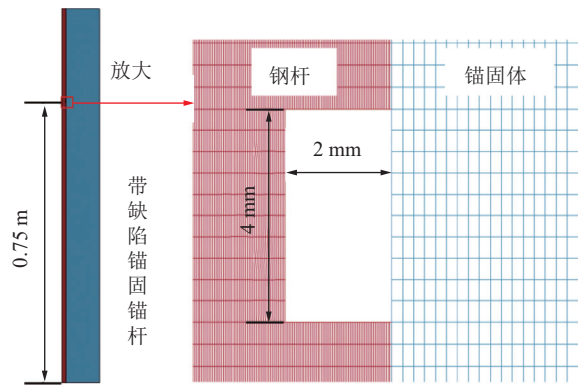


图 11 带缺陷锚固锚杆数值模型

Fig.11 Numerical model of anchor bolt with defect

因在数值模型正确的条件下，不同频率下高频导波均可进行数值计算，只存在波形接收效果优劣的区别。为与实验室结果进行比对，数值模拟激发波频率与实验室频率保持一致为 2.43 MHz。同时数值模型的尺寸及材料参数设置也均与实验室模型保持一致，模拟结果如图 10b 所示。

由图 2b 能量速度频散曲线得到激发波为 2.43 MHz 时，所对应高阶模态的能量速度为 5 503 m/s。实验室激发波采用 0.02 ms 的激发波宽度，接收到缺

陷回波的时间约为 0.275 ms, 数值模拟激发波采用 0.04 ms 的激发波宽度, 接收到缺陷回波时间为 0.284 ms, 按激发波峰值与缺陷回波峰值的时间差作

为传播时间, 计算所得各自的缺陷位置及相应误差见表 2。同时数值模拟与实验室底端回波时间及计算所得杆长和误差也在表中列出。

表 2 激发波为 2.43 MHz 时带缺陷锚固锚杆数值模拟结果与实验室结果

Table 2 Numerical simulation results and laboratory results of anchor bolts with defects when the excitation wave is 2.43 MHz

类别	缺陷回波时间/ms	计算得缺陷位置/m	缺陷位置误差/%	端头回波时间/ms	计算得杆长/m	杆长误差/%
数值模拟结果	0.284	0.726	3.2	0.373	0.971	2.9
实验室结果	0.275	0.729	2.8	0.381	1.021	2.1

由表 2 可得, 数值模拟所得缺陷位置和杆长的误差分别为 3.2% 和 2.9%。模拟结果与实验室结果相差很小, 说明所建立的数值模型可以较好贴合实验, 为进一步研究导波在含锚固体缺陷、杆体脱锚等情况的锚固锚杆中的传播特性奠定基础。

### 3.2 不同缺陷位置对波形的影响

基于上文数值模型的正确性, 进一步研究不同缺陷位置对波形的影响。材料参数与表 1 保持一致, 缺陷位置分别设置在距离锚杆端头 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 m 的位置, 不同缺陷位置的波形图如图 12 所示。

缺陷回波与底端回波的波包位置已在图中标示出, 在 0.12 ms 处的小波包为侧面反射回波, 为验证该猜想, 其他条件保持不变, 只增加锚固体厚度重新进行建模计算, 模拟结果只有该处小波包后移, 由此可证明该波包确为侧面回波。尽管不同位置的缺陷回波幅值差异较大, 底端回波的幅值及接收时间却几乎一样。这是因为缺陷的大小设置均相同, 因此底端接收到的能量差异不大, 幅值大小就几乎没有差别。由数值模拟计算所得缺陷位置与相应误差见表 3。

由表 3 可得, 缺陷位置的误差都在 4% 之内, 由图 11 可知当缺陷位置过于接近端头时, 边界回波和底端回波会与缺陷回波叠加使得波形难以识别。但在首波宽度为 0.04 ms 的条件下, 分别距离锚杆首尾 0.1 m 的缺陷也可检测出来, 说明所建立的数值模型

可以对锚杆大部分长度范围内缺陷进行较为准确的定位。

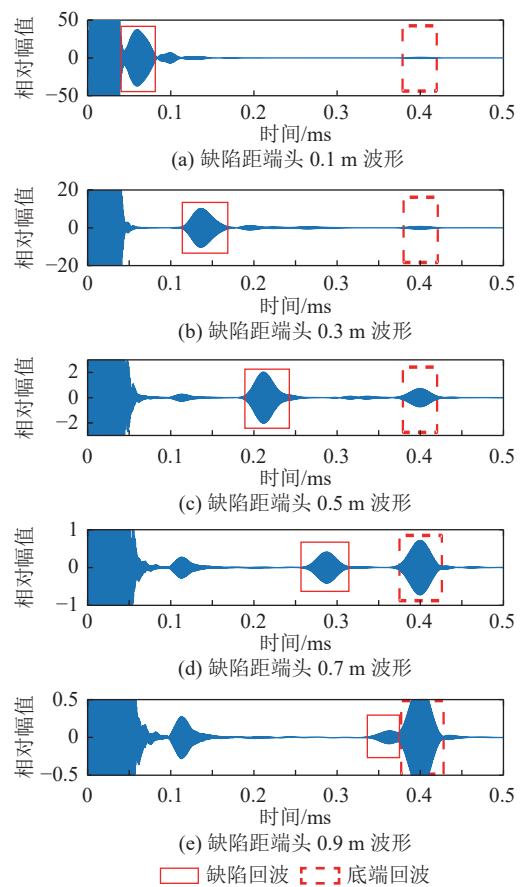


图 12 激发波为 1.541 MHz 时不同缺陷位置的波形  
Fig.12 Waveform of different defect positions when the excitation wave is 1.541 MHz

表 3 激发波为 1.541 MHz 时不同缺陷位置数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results of different defect positions when the excitation wave is 1.541 MHz

缺陷距端头位置/m	缺陷回波时间/ms	计算得缺陷位置/m	缺陷位置误差/%	端头回波时间/ms	计算得杆长/m	杆长误差/%
0.1	0.059	0.104	3.66	0.400	1.010	1.00
0.3	0.136	0.308	2.78	0.400	1.010	1.00
0.5	0.212	0.510	2.07	0.400	1.010	1.00
0.7	0.287	0.710	1.38	0.400	1.010	1.00
0.9	0.362	0.906	1.00	0.400	1.010	1.00



### 3.3 不同缺陷深度对波形的影响

通过在锚固锚杆的内嵌钢筋上设置不同深度的环状缺陷,来研究缺陷深度对于波形的影响。在钢筋距离锚杆端头 0.75 m 处分别设置深度为 1、2、3、4 和 5 mm,轴向长度为 4 mm 的缺陷。材料参数与表 1 保持一致,激发波频率仍选为 1.541 MHz,得到波形图如图 13 所示。由图中可以看到清晰的 4 个波包,其中波包 1 为激发波经两次侧面反射接收到的回波,波包 2 为缺陷回波,波包 3 为底端回波,波包 4 为激发波经底端反射先到达缺陷位置再反射回底端再传播到端头的波包。

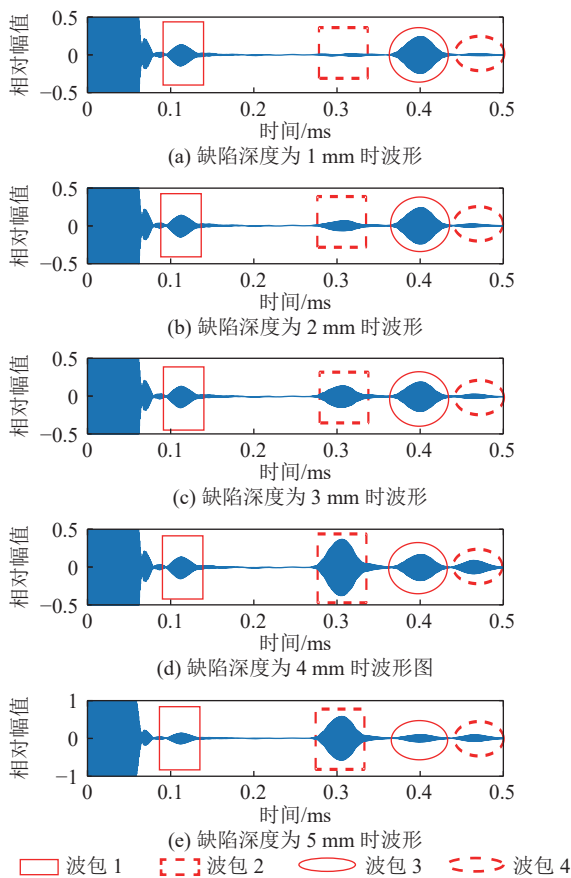


图 13 激发波为 1.541 MHz 时不同缺陷深度的波形  
Fig.13 Waveform of different defect depths when the excitation wave is 1.541 MHz

由图可知,随着缺陷深度的增加,即缺陷面积占锚杆横截面积比例的增加,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。当缺陷深度为 3 mm,即缺陷面积约占锚杆横截面积一半时,如图 13c 所示,缺陷回波幅值与底端回波幅值相当。同时可以看到无论缺陷深度如何变化,排除人工取点的误差,在锚杆端头接收到缺陷回波和底端回波的时间并没有变化,分别为 0.305 ms 和 0.400 ms,计算可得对应缺陷位置在 0.757 m 处,杆长为 1.01 m。

也就是说,缺陷的尺寸不会影响高频导波对缺陷的定位,缺陷深度只会对波包幅值产生影响。

## 4 结 论

1) 数值模拟结果表明锚杆径向、轴向及锚固体径向、轴向单元网格密度对高频导波波包影响程度不同,其中锚杆径向单元网格密度对波形影响最大,设置需最密。通过对锚固锚杆设置不同单元网格密度能够实现高频导波在锚固锚杆中传播的准确数值模拟。

2) 激发波为高频导波时首波宽度的选择对数值计算十分重要,设置合适的首波宽度能够在实现锚固锚杆缺陷定位的同时显著节约计算成本。经多次模拟调试后发现 0.04 ms 的首波宽度能够满足高频导波的数值计算精度。

3) 所建立的带缺陷锚固锚杆的数值模型模拟结果与实验室结果高度吻合,说明特定高频导波的低衰减性确实可以用来进行锚固锚杆缺陷位置的检测。

4) 随着锚杆缺陷面积增加,缺陷回波幅值相应增加,同时底端回波幅值相应减小,但缺陷面积的大小不会影响高频导波对缺陷的定位以及杆长的计算。

5) 高频导波可对缺陷位置进行较准确定位,对缺陷面积进行估算,解决了低频导波不能接收到有效底端回波的问题,弥补了试验与数值模拟结合的空缺,为之后高频导波在含锚固体缺陷、杆体脱锚等情况的锚固锚杆中传播特性的研究奠定基础。

### 参考文献(References):

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.  
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] 卢家呈. 岩土工程锚杆无损检测技术与应用实践研究[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(12): 78-79.  
LU Jiacheng. Study on nondestructive testing technology and application of rock bolt[J]. *Building Technique Development*, 2017, 44(12): 78-79.
- [3] 李 义, 刘海峰, 王富春. 锚杆锚固状态参数无损检测及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1741-1744.  
LI Yi, LIU Haifeng, WANG Fuchun. Non-destructive testing rock bolt grout quality and its applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1741-1744.
- [4] 汪明武, 王鹤龄. 声频应力波在锚杆锚固状态检测中的应用[J]. 地质与勘探, 1998(4): 56-58,61.  
WANG Mingwu, WANG Heling. Application of sonic frequency stress wave to inspection of anchoring state of rock bolts[J]. *Geology and Prospecting*, 1998(4): 56-58,61.

- [5] ZOU D H, CUI Y. A new approach for field instrumentation in grouted rock bolt monitoring using guided ultrasonic waves[J]. *Journal of applied geophysics*, 2011, 75(3): 506–512.
- [6] 李义, 王成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(2): 160–164.  
LI Yi, WANG Cheng. Experiment study on bolt bonding integrity with stress reflected wave method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 160–164.
- [7] CUI Y, ZOU D H. Assessing the effects of insufficient rebar and missing grout in grouted rock bolts using guided ultrasonic waves[J]. *Journal of applied geophysics*, 2012, 79: 64–70.
- [8] YU J D, BYUN Y H, LEE J S. Experimental and numerical studies on group velocity of ultrasonic guided waves in rock bolts with different grouted ratios[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 114: 103130.
- [9] 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.  
WU Bin, LI Longtao, WANG Xiuyan, *et al.* Non-destructive test of a surface defect on a steel bar based on ultrasonic guided wave techniques[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 149–154.
- [10] 吴斌, 张青, 孙雅欣, 等. 一种基于导波技术检测锚杆长度及缺陷的新方法[J]. *无损检测*, 2007, 26(5): 237–240.  
WU Bin, ZHANG Qing, SUN Yaxin, *et al.* A new method of inspecting the length of rock bolt and the defect in it based on guided wave techniques[J]. *Non-Destructive Testing*, 2007, 26(5): 237–240.
- [11] 何存富, 刘增华, 孙雅欣, 等. 基于超声导波技术对弯管中缺陷检测的实验研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(18): 1662–1665.  
HE Cunfu, LIU Zenghua, SUN Yaxin, *et al.* Experimental study on defect detection in curved pipes using ultrasonic guided waves technique[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(18): 1662–1665.
- [12] 何存富, 孙雅欣, 刘增华, 等. 弯管缺陷超声导波检测的有限元分析[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(4): 289–294.  
HE Cunfu, SUN Yaxin, LIU Zenghua, *et al.* Finite element analysis of defect detection in curved pipes using ultrasonic guided waves[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(4): 289–294.
- [13] 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.  
RONG Xiaoyang. Study on the behavior of guided wave propagation and detection of defect in rock bolt[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [14] 张昌锁, 李义, 赵阳升, 等. 锚杆锚固质量无损检测中的激发波研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1240–1245.  
ZHANG Changsuo, LI Yi, ZHAO Yangsheng, *et al.* Study on optimum excitation signal in grout quality nondestructive testing of rock bolt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1240–1245.
- [15] BEARD M D. Guided wave inspection of embedded cylindrical structures[D]. London: University of London, 2002.
- [16] 何存富, 孙雅欣, 王秀彦, 等. 高频纵向超声导波在埋于无限大介质中钢杆的传播特性[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(3): 82–88.  
HE Cunfu, SUN Yaxin, WANG Xiuyan, *et al.* Propagation characteristics of high frequency longitudinal ultrasonic guided waves in steel rod embedded in infinite medium[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(3): 82–88.
- [17] 吴斌, 孙雅欣, 何存富, 等. 全长黏结型锚杆高频超声导波检测应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 181(2): 397–403.  
WU Bin, SUN Yaxin, HE Cunfu, *et al.* Application of high frequency ultrasonic guided waves to inspection of full-length-bonding bolt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 181(2): 397–403.
- [18] 余海军, 王孝卿, 王良涛, 等. 管道的相控阵超声高频导波检测[J]. *无损检测*, 2020, 42(10): 32–39.  
YU Haijun, WANG Xiaoqing, WANG Liangtao *et al.* Phased array ultrasonic high frequency guided wave testing of pipe[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(10): 32–39.
- [19] 蔡永江. 高频导波快速检测管道腐蚀技术研究[J]. *科技创新导报*, 2019, 16(20): 115–117.  
CAI Yongjiang. Study on high frequency guided wave rapid detection of pipeline corrosion[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(20): 115–117.
- [20] 赵宇亮. 超声导波在锚杆锚固体中传播的数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.  
ZHAO Yuliang. Study on the ultrasonic guided wave spreading in the numerical simulation of bolt anchoring system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [21] 潘立业, 张昌锁, 马洁腾, 等. 高频超声导波检测锚杆有效锚固长度分析[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(12): 24–26, 31.  
PAN Liye, ZHANG Changsuo, MA Jieteng, *et al.* Analysis on effective anchoring bolt length detected with high frequency ultrasonic guided wave[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(12): 24–26, 31.
- [22] 张胜利, 张昌锁, 王银涛. 锚杆锚固质量无损检测方法分析[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(5): 212–215.  
ZHANG Shengli, ZHANG Changsuo, WANG Yintao. Analysis of nondestructive detection method of bolt anchoring quality[J]. *Coal Mine Safety*, 2014, 45(5): 212–215.
- [23] 李鹏, 张昌锁. 锚杆锚固质量的高频导波检测方法[J]. *太原理工大学学报*, 2019, 50(5): 606–610.  
LI Peng, ZHANG Changsuo. On the method of grout quality testing of rock bolt by high frequency guided wave[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2019, 50(5): 606–610.
- [24] 曾杰, 张昌锁, 张旭进. 高频纵向超声导波在锚杆中传播特性数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(9): 135–140.  
ZENG Jie, ZHANG Changsuo, ZHANG Xujin. Numerical simulation study on the propagation characteristics of high-frequency longitudinal ultrasonic guided waves in bolts[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(9): 135–140.
- [25] 张玥, 张昌锁, 牛潘宇. 高频纵向导波在钢杆中传播的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S2): 598–606.  
ZHANG Yue, ZHANG Changsuo, NIU Panyu. Numerical Simulation of High Frequency Longitudinal Guided Wave Propagation in Steel Rod[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S2): 598–606.
- [26] PAVLAKOVIC B N. Leaky guided ultrasonic waves in NDT [D]. London: University of London, 1998.
- [27] ALLEYNE D, CAWLEY P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 89(3): 1159–68.
- [28] ZHANG C S, ZOU D H, MADENGA V. Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(4): 634–639.