

# 锚杆无损检测稳定波形的激振点和检测点

谷洪飞, 李青锋\*, 彭跃金, 黄启云, 杨佳楠

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为研究锚杆无损检测稳定波形的激振点和检测点,利用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件建立锚固体模型,在模型锚杆端头不同位置施加瞬态激振进行数值计算,研究表明:在锚杆无损检测时,随着偏离锚杆端头中心位置的长度增加,横向应力波的振幅也逐渐增大,对纵波的影响也逐渐增大,最佳激振点应该选择锚杆端头中心位置;在锚杆无损检测时,选择最佳激振点激振后,检测点的位置变化对横向应力波形和纵向应力波的影响可以忽略不计;选择最佳激振点得到的纵波可以清晰地得到锚固起始位置和锚固结束位置,为工程检测提供了理论依据,提高了工程检测的准确性。

**关键词:**锚杆;无损检测;激振点;检测点;FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)02-0012-06

## The Excitation Point and Detection Point of the Stable Waveform of Anchor Rod Nondestructive Testing

Gu Hongfei, Li Qingfeng, Peng Yuejin, Huang Qiyun, Yang Jianan

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the excitation point and detection point of the stable waveform of the anchor nondestructive testing, FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software is used to establish the anchor solid model, and the transient excitation is applied to different positions of the end of bolt for numerical calculation. Results show that when the amplitude of transverse stress wave increases, the influence on the longitudinal wave will increase with the length of deviation from the central position of the end head of the bolt increases during the non-destructive testing of the bolt. The effect of the position change of the check point on the transverse stress wave and the longitudinal stress wave can be neglected when the best excitation point is selected for the non-destructive testing of the anchor bolt. By choosing the best excitation point, the starting position and ending position of anchorage can be clearly obtained, which provides theoretical basis for engineering detection and improves the accuracy of engineering detection.

**Keywords:** anchor; nondestructive examination; exciting point; check point ;FLAC<sup>3D</sup>

目前,锚杆支护无损检测在矿业工程中应用广泛,锚杆无损检测主要采用瞬态激振低应变检测的方法<sup>[1]</sup>。很多科研工作者<sup>[2-4]</sup>进行了无损检测的理论和实验的研究,在锚杆锚固质量可行性研究方面和锚杆质量方法的选择方面取得了一定的进展,提高了无损检测在工程中的应用水平。文献[5,6]在无损检测的波形分析方法上进行了很多的优化,对无损检测波形的后处理起到了积极的作用。文献[7-9]在锚固力和轴力的检测方面的研究也取得了一定的进展,进一步完善了无损检测技术。然而,实际的无损检测工作过程中,在锚杆端头施加瞬态激振时,没有最佳激振点和检测点的理论,需要工作人员有足够

收稿日期:2018-12-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2130)

\*通信作者,E-mail: liqingfeng0712@163.com

的现场检测经验,造成了无损检测精度参差不齐<sup>[10]</sup>,影响检测人员的工作效率.因此,对无损检测的最佳激振点和检测点的研究尤为重要.对于锚杆支护无损检测最佳激振点和检测点的研究,笔者利用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件对预应力锚固体锚杆外露端面施加动力荷载,探究锚杆锚固无损检测最佳激振点和检测点.

## 1 数值方法

### 1.1 锚杆无损检测原理

锚杆无损检测主要利用低应变反射波法<sup>[11]</sup>,在锚杆外露端面耦合一个加速度传感器,加速度传感器与无损检测仪连接,在锚杆外露端施加瞬态激振力,应力波沿锚杆传播过程中遇到波阻抗变化的界面时,将发生透射、反射,通过无损检测仪记录波形,通过记录的应力波形分析锚杆锚固段锚固情况,如图1所示.

### 1.2 锚固体数值模型建立

FLAC<sup>3D</sup>是连续介质力学分析软件,可以进行非线性动力响应分析,具有强大的动力分析功能.笔者用FLAC<sup>3D</sup>软件建立初始模型<sup>[12]</sup>,模型尺寸:围岩尺寸为400 mm×600 mm×2 400 mm,锚杆直径20 mm,锚杆长度2 200 mm,锚固孔径直径34 mm,孔深2 000 mm,锚固剂厚度7 mm,锚固长度1 000 mm.由于模型求解时间受网格尺寸的影响很大,考虑到计算机内存、计算时间等因素,经过多次网格的划分求解,结合计算精度和计算速度,最终所建模型单元体个数为37 120个.在动力分析部分,为了减少波在边界上的反射,模型边界条件选取无反射边界条件<sup>[13]</sup>.

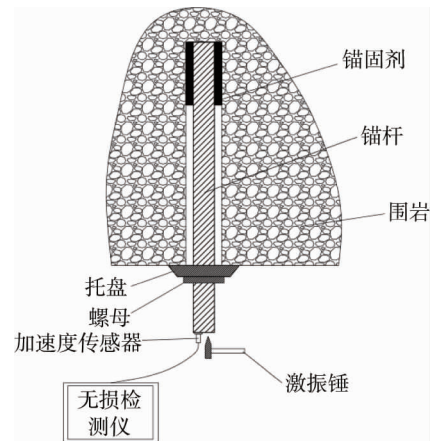


图1 无损检测系统

本文瞬态激振采用半正弦波脉冲信号,即  $F(t) = \begin{cases} A(1 - \cos \frac{2\pi}{t_0}t), & 0 \leq t \leq t_0; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$  模型中所用的岩石

力学参数如表1所示.

表1 模型中岩石力学参数

介质名称	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	粘结力/MPa
岩石	2 810	25	20	2.5	39	8.7
锚固体	2 600	38	76	2.0	35	8.0
锚杆	7 900	160	280	/	/	/
托盘	7 900	160	280	/	/	/

## 2 数值计算及结果分析

### 2.1 不同激振点在锚杆中心点检测的应力波波形的分析

为了研究锚杆锚固无损检测最佳激振点,建立了不同动力荷载施加点的锚固体模型,模拟纵向和横向应力波在预应力锚杆中的传播过程.如图2所示,分别建立锚杆中心处激振、锚杆中心与边缘1/4处激振、锚杆中心与边缘1/2处激振、锚杆中心与边缘3/4处激振、锚杆边缘处激振5种方案的模型,锚杆的锚固形式采用端锚锚固方式.分别在5种方案施加动荷载后,横向锚杆中心节点的速度历程曲线如图3所示.

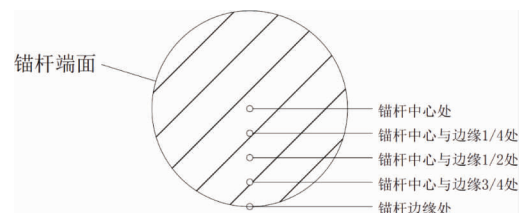


图2 锚杆端面激振位置

由图3可知:激振力施加到锚杆端头不同的坐标点后,产生横向应力波,其中,图3b~图3d的横向应力波振幅较大,图3a,图3e横向应力波振幅无限接近于零,但是在检测锚杆的锚固情况时,横向应力波为干扰波,即横向应力波的大小影响纵向波的波形,横向应力波最小时的坐标点为无损检测的最佳激振点.

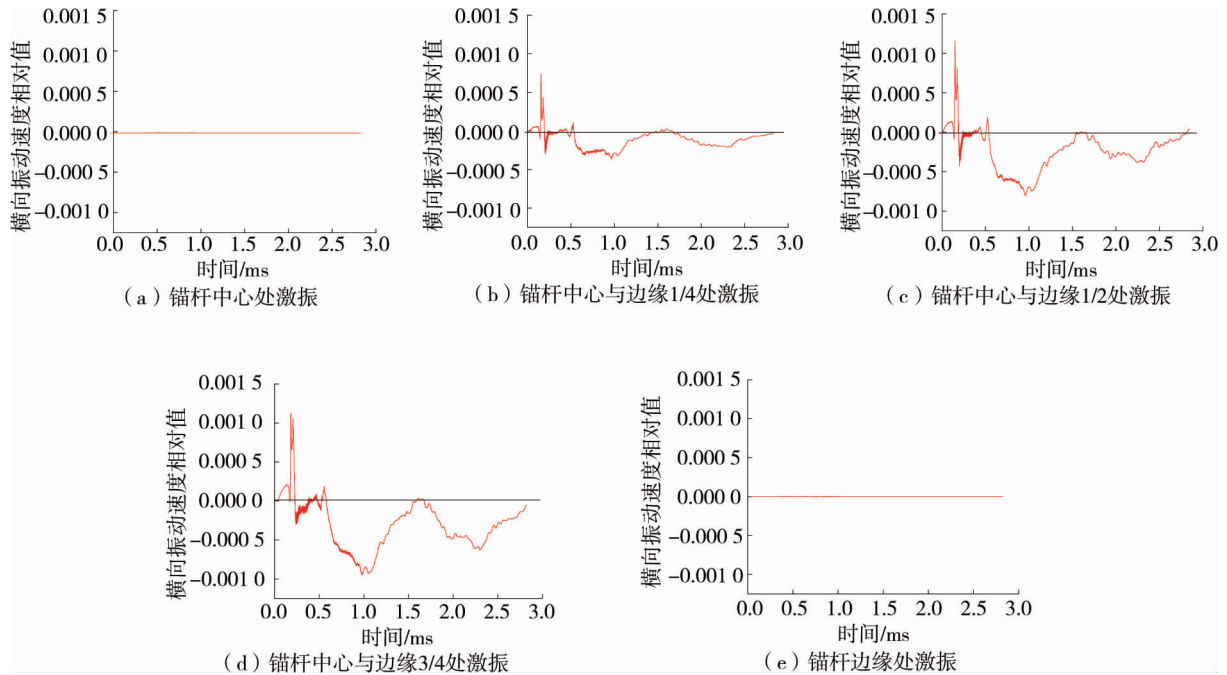


图3 不同激振点在同一检测点的横向应力波波形

5种方案施加动荷载后,锚杆中产生的横向应力波波形不相同.其中,锚杆中心处激振产生的波形和锚杆边缘处产生的波形振幅趋于零,锚杆中心与锚杆边缘1/4处产生的波形、锚杆中心与锚杆边缘1/2处产生的波形、锚杆中心与锚杆边缘3/4处产生的波形逐渐增大;在波形传播至1.0ms时横向波波形的幅值最大.说明无损检测时激振点应该选取锚杆中心和锚杆边缘.

由图4a可知在锚杆中心处激振时波形可以得到锚杆锚固情况信息,图4b显示在锚杆边缘处激振波形没有得到有用的波形信息,虽然在锚杆边缘处激振的横向振动波对纵波的影响可以忽略不计,但是在此处激振得到的纵向波由于远离锚杆中心,太靠近锚杆边缘,应力波的弥散效应太强,造成在锚杆边缘处激振产生的纵向波并没有得到有用信息,结合对横波的分析,最佳激振点应为锚杆中心位置.

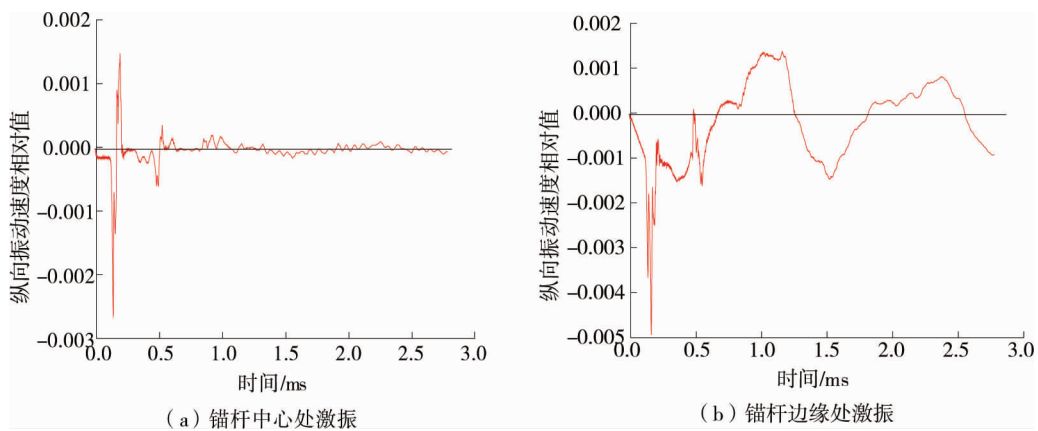


图4 不同激振点在同一检测点的纵向应力波波形

## 2.2 锚杆中心点激振不同检测点的应力波形分析

在锚杆外露段端头中心激振,检测不同位置的横波变化值得到图5,纵波变化速度值得到图6.

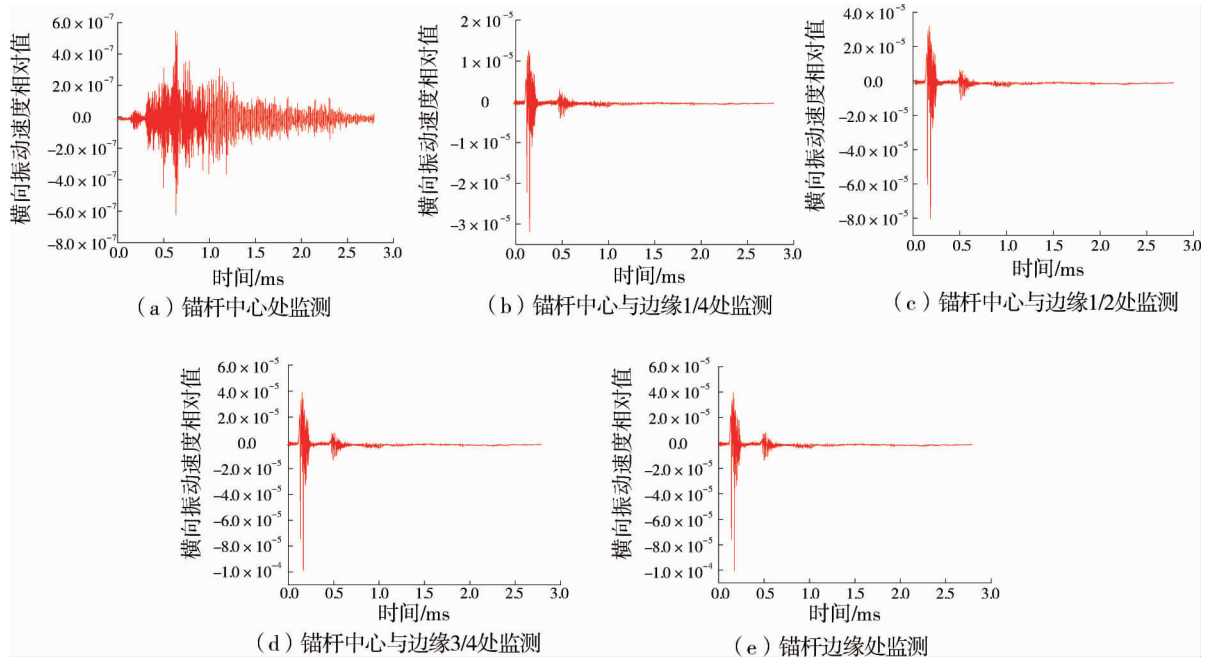


图 5 锚杆中心点激振不同检测点的横向振动应力波波形

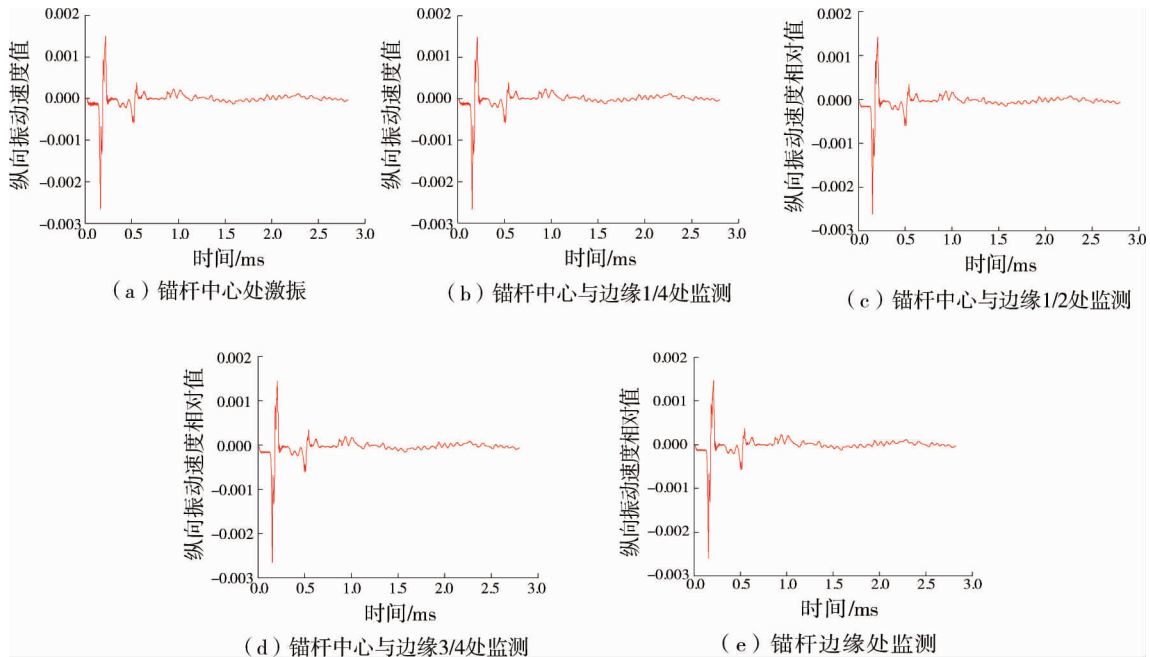


图 6 锚杆中心点激振不同检测点的纵向振动应力波波形

由图 5 可知 5 种检测方案的横波均为锚杆自振波,5 种波形在频率和振幅方面有较大差异,但振幅相对图 6 中纵波很小.由图 6 可知纵波在不同检测点没有变化,这与图 5 中横波振幅小相吻合,所以检测点的位置不影响锚杆无损检测.

### 2.3 波形分析

本文模拟的锚固体为端锚形式,在锚杆中心施加瞬态激振力并在锚杆中心处检测锚杆内应力波曲线变化,应力波曲线如图 7 所示.

由图 7 可知:锚固体在施加瞬态激振力后,会产生首波,且首波振幅较大,首波过后应力波在未锚固段传播,传播到锚固起始位置时,相对于首波有一个明显的反相波峰,反相波峰后,应力波在锚固段传播,且在锚固结束位置有一个同相波峰,与文献[1,2]提出的预应力锚杆纵向应力波的传播规律相同,即在锚固围岩里的预应力锚杆锚固开始处会有一反相的反射应力波,而在锚固结束处有一同向的反射波.

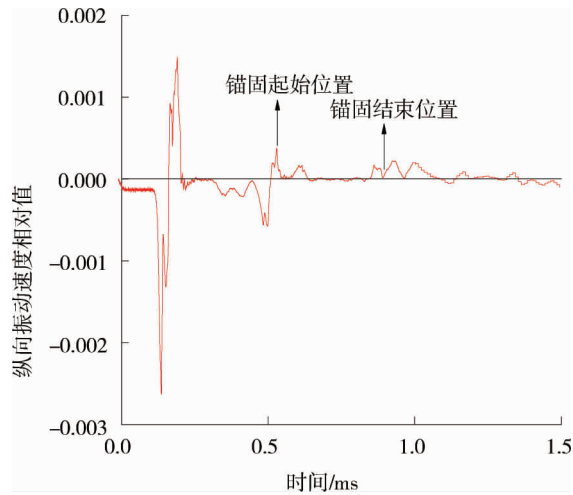


图7 锚杆中心点激振纵向振动应力波波形

### 3 实验验证

为了验证前文中锚杆锚固无损检测最佳激振点数值模拟结论,在锚杆端部不同位置施加激振力,利用锚杆质量检测仪检测应力波在锚杆中的传播过程如图8所示.由于验证试验需足够大的锚杆端面,且本文所研究的内容不涉及波形传播规律,只进行了锚杆端面最佳激振点研究,所以本试验选取直径为32 mm,长度为2.2 m的锚杆,且锚杆未进行锚固,分别建立锚杆中心处激振、锚杆中心与边缘1/2处激振、锚杆边缘处激振3种方案的模型.由于验证最佳检测点需要更大的锚杆端面,本实验未进行锚杆无损检测最佳检测点的研究,分别在3种方案施加3次激振力后,纵波速度时程曲线分别如图9~图11所示.



图8 锚杆无损检测

结合图9~图11可知:激振位置为锚杆端部中心时,波形稳定、清晰;随着施加激振力的位置由锚杆端部中心到锚杆端部边缘处,首波后的波动幅值越来越明显,且应力波的波形越来越杂乱不稳定,特别是在锚杆端部边缘处激振产生的波形随机性较大,可以看出激振位置远离锚杆中心,太靠近锚杆边缘,应力波的弥散效应较强,与数值模拟结果吻合,验证了最佳激振点为锚杆端头中心位置.

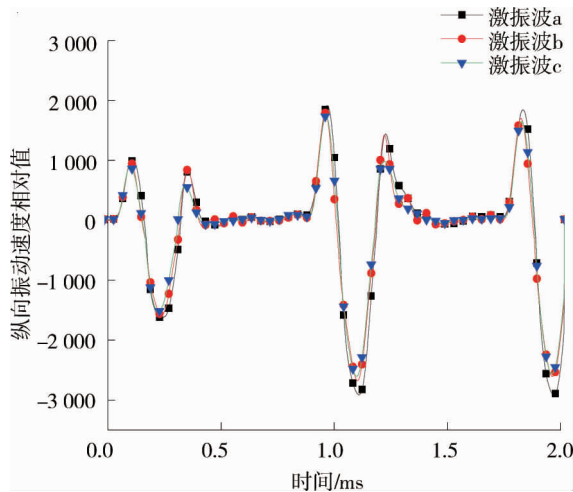


图9 锚杆端部中心激振波波形

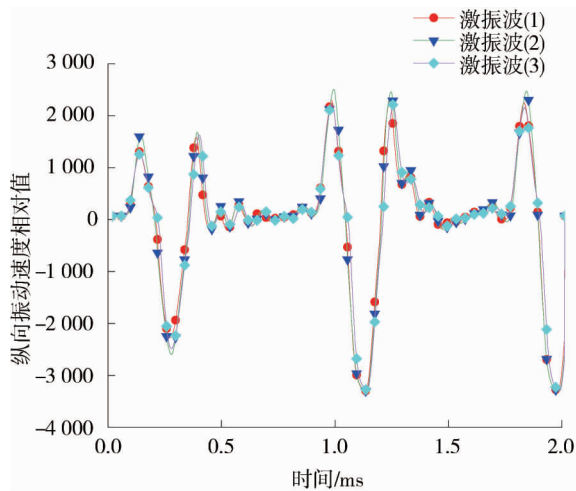


图10 锚杆端部中心与边缘1/2处激振波波形

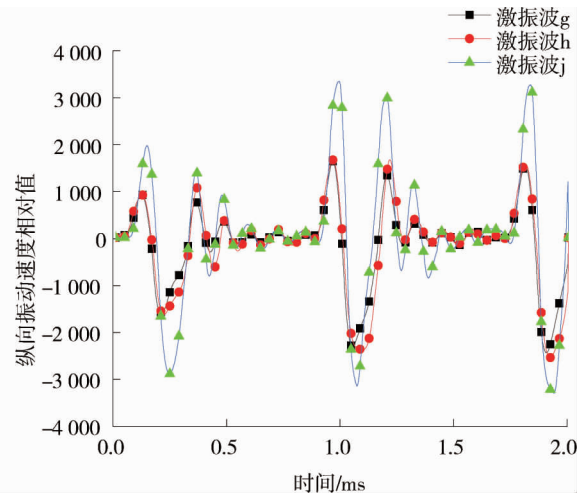


图11 锚杆端部边缘处激振波波形

## 4 结论

1) 在锚杆无损检测时,随着偏离锚杆端头中心位置的长度增加,横向应力波的振幅也逐渐增大,对纵波的影响也逐渐增大;最佳激振点应该选择锚杆端头中心位置。

2) 在锚杆无损检测时,选择最佳激振点激振,检测点的变化对横向应力波形和纵向应力波的影响可以忽略不计。

3) 选择最佳激振点得到的纵波可以清晰地得到锚固起始位置和锚固结束位置,为工程检测提供了理论依据,提高了工程检测的准确性。

## 参考文献:

- [1] 李青锋,朱川曲,唐海.锚杆无损检测力锤激励机理与实验[J].物探与化探,2009,33(2):224-228.
- [2] 李青锋,李兴华,巫静波.应力波法无损检测煤矿锚索锚固质量的研究[J].矿冶工程,2007(6):1-3.
- [3] 张小波,吴银成,孙志飞,等.一种矿用锚杆(索)长度无损测量方法[J].工矿自动化,2015,41(1):76-79.
- [4] 李义,张昌锁,王成.锚杆锚固质量无损检测几个关键问题的研究[J].岩石力学与工程学报,2008(1):108-116.
- [5] Rong X, Lin P, Liu J, et al. A New Approach of Waveform Interpretation Applied in Nondestructive Testing of Defects in Rock Bolts Based on Mode Identification[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, Article ID 7920649. <https://doi.org/10.1155/2017/7920649>.
- [6] Furse C, Smith P, Diamond M. Feasibility of reflectometry for nondestructive evaluation of prestressed concrete anchors[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1322-1329.
- [7] 张雷,茅献彪,陈占清,等.锚杆锚固质量无损检测信号批量分析方法[J].煤矿安全,2015,46(8):99-102.
- [8] 薛道成,吴宇,张凯.煤矿锚杆轴向受力无损检测试验研究与应用[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):375-379.
- [9] 李青锋,周泽,唐湘隆,等.树脂锚杆波动机理与锚固承载力无损检测初探[J].地下空间与工程学报,2016,12(s2):766-771.
- [10] 赵东平,胡炜,吴佳晔.隧道锚杆锚固质量无损检测误差控制技术研究[J].铁道工程学报,2018,35(4):81-86.
- [11] 樊克松,申宝宏,刘少伟,等.巷道顶板锚固体应力波传播特性数值试验与应用[J].采矿与安全工程学报,2018,35(2):245-253.
- [12] 万世文,徐金海,吴锐.预应力锚杆弹性波检测的激振波及其传播规律研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):581-584.
- [13] 刘少伟,李鑫涛,樊克松.树脂锚杆锚固长度声波探测技术及数值试验[J].中国安全生产科学技术,2014(4):31-37.