

# 基于辅助检测杆的锚杆预紧效果检测技术

卢清芹, 李青锋\*, 张建业

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为提高信号可识别程度,减少外部条件对锚杆检测信号的干扰,设计一种用于配合锚杆预紧效果检测技术的辅助检测杆.利用 FLAC<sup>3D</sup>建立含辅助检测杆的锚固系统实体单元模型,对锚固系统外露端施加横向激振力并监测其振动信号,分析不同预紧状态下锚固系统横向振动特征,并对其预紧效果做出评价,从而验证了辅助检测杆配合锚杆预紧效果检测的可行性.预紧效果检测试验也表明辅助检测杆配合锚杆预紧效果检测的有效性.

**关键词:**辅助检测杆;无损检测;预紧效果;数值模拟

**中图分类号:**TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)01-0009-08

## Detection Technology of Bolt Preload Effect Based on Auxiliary Detection Rod

LU Qingqin, LI Qingfeng, ZHANG Jianye

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

**Abstract:** In order to improve the identifiability of the signal and reduce the interference of external conditions on the detection signal of the bolt, an auxiliary detection rod is designed to cooperate with the detection technology of the bolt pre-tightening effect. The solid element model of anchorage system with auxiliary detection rod is established by FLAC<sup>3D</sup>. By applying lateral excitation force to the exposed end of the anchoring system and monitoring its vibration signal, the transverse vibration characteristics of the anchoring system under different preloading states are analyzed, and the preloading effect is evaluated, thus verifying the feasibility of the auxiliary detection rod with the bolt pre-tightening effect detection. Preload effect test also shows the effectiveness of the auxiliary detection rod with the bolt preload effect detection.

**Keywords:** auxiliary detection rod; nondestructive testing; preloading effect; numerical simulation

锚杆支护是巷道围岩支护的一种形式,具有施工造价低、工艺简单等优点,既能作为辅助支护也能作为主体支护,因此锚杆支护成为我国巷道支护的主要形式,锚杆支护率平均达到 75% 以上<sup>[1]</sup>.为了保证锚杆锚固的有效性,需要通过检测锚杆相关参数来进行评价,而传统的锚固力拉拔检测属于破坏性试验,具有不可逆性,所以为了不损害锚杆支护系统,国内专家在无损检测技术方面做了大量研究<sup>[2-5]</sup>.无损检测的方法主要为弹性波法<sup>[6-7]</sup>,其原理是在锚杆外露端以主动激振的方式,运用一维弹性杆波动理论分析锚杆对弹性波的响应.但由于锚杆无损检测技术的研究起步相对较晚,很多研究成果在锚杆无损检测领域没有得到有效的应用.很多科研工作者研发出多类锚杆无损检测装置及仪器,但因锚杆外露端长度短等多因素影响,存在波形识别和激振困难等问题,使无损检测的准确度和效率较低,导致锚杆无损检测技术的推广应用滞后.因此,本文基于现有的无损检测技术,通过理论分析、数值模拟和实验室试验,提出利用辅助

收稿日期:2022-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5227041958)

\*通信作者, E-mail: lqf66@hust.edu.cn

检测杆配合无损检测的设想以解决上述问题,并通过数值模拟和试验验证其可行性和有效性。

## 1 外露段加长的类悬臂梁横向振动分析

设计一种用于煤矿锚杆无损动力检测的辅助检测杆,用以提高锚杆无损动力检测的示波精度.根据实际情况建立含辅助检测的锚杆锚固系统,结合类悬臂梁的振动特性<sup>[8]</sup>进行分析.考虑到锚固体与围岩的良好胶结,其相对位移较小,锚固段整体可视为锚杆固支端,因托盘和围岩对锚杆轴向位移和横向位移的限制,其轴向约束简化成扭转刚度系数为  $K_\theta$  的弹簧弹性支撑,横向约束简化成刚度系数为  $K$  的弹簧弹性支撑.从而,含辅助检测杆的锚杆横向往振动力学模型简化为一端固定、另一端弹性支撑的力学模型,如图 1a 所示。

图 1a 所示的模型属于超静定结构,采用力法对该结构进行静力分析.锚固介质及所黏结的锚杆结构部分为锚固系统的锚固段,锚固段开始端面至托板处为锚固系统的自由段,托板至辅助检测杆端为锚固系统的外露段,其中自由段长度为  $a$ ,外露段长度为  $l$ .通过解除多余约束,用相应的内力或反力代替,使其变为静定结构的受力模型,如图 1b 所示,最终可以求解得出接触面处的作用力。

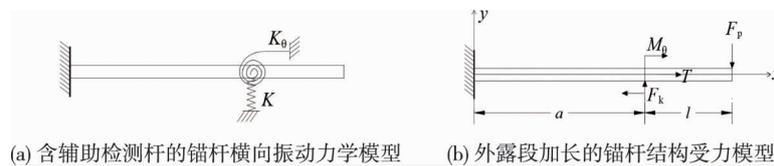


图 1 外露段加长的锚杆横向振动

采用力法对图 1b 所示的结构求解,得结构所受弯矩  $M_\theta$  和支座反力  $F_k$  分别为

$$M_\theta = \frac{6EIa(2l+a) + a^5K - a^4(a+l)K}{4EIa^3 + a^4KK_\theta - 12E^2I^2 - 12EIaK_\theta} F_p K_\theta; \quad (1)$$

$$F_k = \frac{a^2(3l+2a)(4EIa^3K + a^4KK_\theta - 12E^2I^2 - 12EIaK_\theta) + 6EIa(2l+a) + a^5K - a^4(a+l)K}{(2a^3K - 6EI)(4EIa^3K) + a^4KK_\theta - 12E^2I^2 - 12EIaK_\theta}. \quad (2)$$

式中:  $M_\theta$  为结构所受弯矩;  $E$  为弹性模量;  $I$  为截面惯性矩;  $F_p$  为结构所受激振力;  $F_k$  为结构所受支座反力。

根据图 1b 所示的结构,当外露端受瞬态激励后会产生多自由度的振动,取振动第一阶频率对结构系统动力特性进行分析。

利用瑞利法近似确定该结构一阶固有圆频率  $\omega$  :

$$\omega^2 = \frac{EI \int_0^{a+l} [y''(x)]^2 dx}{\bar{m} \int_0^{a+l} [y(x)]^2 dx}. \quad (3)$$

式中:  $\bar{m}$  为自由段和外露段结构平均质量;  $y(x)$  为结构沿水平横向  $x$  处的挠度。

根据材料力学的挠度计算公式,可得到在结构上由静荷载产生的挠度计算函数式:

$$y(x) = \begin{cases} -\frac{F_p x^2(3a+3l-x)}{6EI} + \frac{F_k x^2(3a-x)}{6EI} - \frac{M_\theta x^2}{2EI}, & 0 \leq x \leq a; \\ -\frac{F_p x^2(3a+3l-x)}{6EI} + \frac{F_k a^2(3x-a)}{6EI} - \frac{M_\theta a(2x-a)}{2EI}, & a < x \leq a+l. \end{cases} \quad (4)$$

对函数  $y(x)$  求二阶导数,如式(5)所示,其中当  $x=a$  时二阶导数不存在。

$$y''(x) = \begin{cases} -\frac{F_p(a+l-x)}{EI} + \frac{F_k(a-x)}{EI} - \frac{M_\theta}{EI}, & 0 \leq x \leq a; \\ -\frac{F_p(a+l-x)}{EI}, & a < x \leq a+l. \end{cases} \quad (5)$$

求积分得

$$\int_0^{a+l} [y(x)]^2 dx = \left[ \frac{33}{35} F_p^2 (a+l)^7 + F_k^2 \left( \frac{33}{35} a^7 + 4a^6 l + 6a^5 l^2 + 9a^4 l^3 \right) + \right. \\ \left. M_\theta^2 \left( \frac{9}{5} a^5 + 9a^4 l + 18a^3 l^2 + 12a^2 l^3 \right) - \right. \\ \left. F_p F_k \left( \frac{38}{35} a^7 + \frac{33}{5} a^6 l + \frac{51}{2} a^5 l^2 + \frac{15}{2} a^3 l^4 + \frac{33}{20} a^2 l^5 \right) + \right. \\ \left. F_k M_\theta \left( \frac{13}{5} a^6 + 6a^5 l + \frac{21}{2} a^4 l^2 + 6a^3 l^3 \right) + \right. \\ \left. F_p M_\theta \left( \frac{13}{5} a^6 + \frac{48}{5} a^5 l + \frac{39}{2} a^4 l^2 + 24a^3 l^3 + \frac{57}{4} a^2 l^4 + \frac{33}{10} a l^5 \right) \right] / 36E^2 l^2; \quad (6)$$

$$\int_0^{a+l} [y''(x)]^2 dx = \{ [F_k a - F_p(a+l) - M_\theta]^2 a + [F_k a - F_p(a+l) - M_\theta] (F_p - F_k) a^2 + \frac{1}{3} (F_p - F_k)^2 a^3 + \frac{1}{3} F_p^2 l^3 \} / E^2 l^2. \quad (7)$$

托板因受到螺母预紧作用,对巷道外端部围岩壁产生托锚效果,施加的预紧力使围岩与托板之间形成影响锚固系统振动的结构面,因此弹簧刚度系数  $K$  和扭转刚度系数  $K_\theta$  与结构面直接相关,通过分析托板与围岩接触的结构面变形特征可以确定各刚度与锚杆轴向受力的关系<sup>[9]</sup>.

由试验确定结构面应变和法向应力间的关系,得到结构面的法向刚度,然后利用托板微元段受力平衡,求得托板与围岩之间结构面的法向刚度系数  $K_n$  为

$$K_n = \frac{E_j \exp(T/AE_j)}{\varepsilon_u}. \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_u$  为结构面极限应变;  $E_j$  为结构面闭合产生变形的当量模量;  $T$  为锚杆所受轴力;  $A$  为托板与围岩接触面面积.

取托板上平行于锚杆横向振动方向的单位厚度的微元体为研究对象,得到扭转刚度系数  $K_\theta$  与锚杆轴向受力  $T$  的关系为

$$K_\theta = \frac{l^3}{24} K_n = \frac{l^3}{24} \frac{E_j \exp(T/AE_j)}{\varepsilon_u}. \quad (9)$$

在直剪试验中,一般采用双曲线表示相对切向位移  $\Delta u_s$  与切向应力  $\sigma_s$  之间的非线性关系,则结构面切向剪切刚度系数  $K_s$  为

$$K_s = \frac{\partial \sigma_s}{\partial \Delta u_s} = C_1 \gamma \left( \frac{\sigma_n}{P_0} \right)^{C_2} \left[ 1 - \frac{C_3 \sigma_s}{\sigma_n \tan \varphi} \right]. \quad (10)$$

式中:  $C_1, C_2, C_3$  为实验非线性参数;  $\gamma$  为水重度;  $\sigma_n$  为结构面法向应力;  $P_0$  为大气压;  $\varphi$  为结构面外摩擦角.

取托板垂直于锚杆横向振动方向的单位厚度的微元体为研究对象,得到弹簧刚度系数  $K$  为

$$K = K_s d. \quad (11)$$

式中:  $d$  为托板垂直于锚杆横向振动方向的长度.

从而,根据式(3)便可得到外露段加长锚杆横向振动固有圆频率.

## 2 预紧状态检测数值模拟

### 2.1 模型的建立及材料的物理力学参数选取

参考煤矿常用的锚杆锚固系统参数,利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立含辅助检测杆的锚杆锚固模型,如图 2 所示.X

轴为水平方向,  $Y$  轴为锚杆轴线方向,  $Z$  轴为重力方向. 其中, 锚杆长 1.95 m, 直径 0.02 m; 锚孔深度 1.80 m, 直径 0.03 m; 锚固介质长 0.50 m, 厚 0.01 m; 围岩尺寸为 0.4 m × 0.9 m × 0.6 m; 螺母长 0.025 m, 内径 0.020 m, 外径 0.030 m; 托盘尺寸为 0.095 m × 0.005 m × 0.095 m, 其预留孔洞的直径为 0.026 m; 辅助杆长 1 m, 直径 0.03 m.

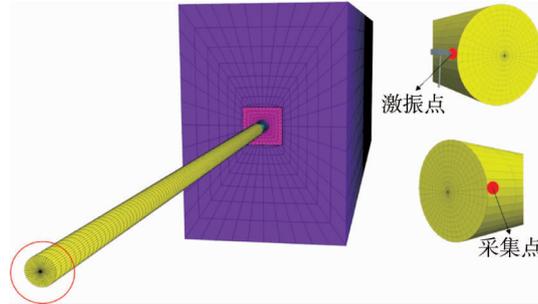


图2 含辅助检测杆的锚杆锚固模型

在数值模型中, 锚杆、螺母、托板及辅助杆均为弹性模型, 围岩、锚固介质为摩尔-库伦模型, 各部分材料参数见表 1.

表 1 数值模拟材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa	粘接强度/MPa	内摩擦角/(°)
锚杆	210	0.30	7 840			
托板	210	0.30	7 840			
螺母	210	0.30	7 840			
围岩	25	0.30	2 810	2.5	8.7	39
锚固介质	38	0.25	2 600	2.0	8.0	35
辅助检测杆	210	0.30	7 840			

## 2.2 激振力函数设置

数值模拟中, 激振力通常采用半正弦波来模拟, 但半正弦波的一阶导数不连续<sup>[10]</sup>. 为此, 本文采用式 (12) 所示的函数  $F(t)$  模拟激振力.

$$F(t) = \begin{cases} \frac{p}{t_0} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_0}t\right) \right], & 0 \leq t < t_0; \\ 0, & t \geq t_0. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $F(t)$  为激振力;  $t$  为运行时间;  $t_0$  为激振力的作用时间;  $p$  为激振力的冲量.

本次模拟试验中, 在杆件外露端侧面施加激振力, 激振力的作用方向为  $X$  轴负向, 激振力的作用时间为 0.6 ms, 峰值激振力为 2 kN. 无损检测的信号采集点布设于激振点关于杆件轴心对称的位置 (见图 2), 信号采集点将获取受激振后锚杆的横向 ( $X$  轴方向) 振动信号.

## 2.3 预紧状态无损检测时域分析

随着预紧力的增大, 托板与围岩之间的结构面闭合程度也不断增大, 同时结构面所提供的静摩擦力  $f$  也随之增大. 当激振力幅值小于静摩擦力时, 锚固系统应视为一端铰支、另一端固支的结构; 当激振力幅值大于静摩擦力时, 锚固系统应视为类悬臂梁结构. 因此在检测过程中, 可以通过分析锚固系统横向振动特性来评价预紧力锚杆的锚固效果.

施加激振力的锚固系统时域波形如图 3 所示. 将激振力引起的第一个速度峰值定为激振首峰, 当激振首峰振动方向与激振力作用方向 ( $X$  轴的负方向) 相同时定义为同向, 当激振首峰振动方向与激振力作用方向相反时定义为反向.

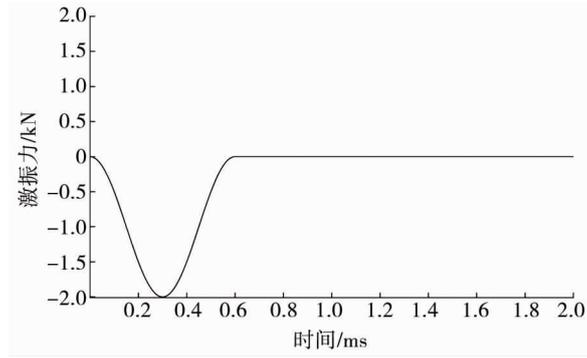


图 3 施加激振力的锚杆时域波形

图 4 为不同预紧力下锚固系统时域检测信号和围岩塑性区分布图,用来分析不同预紧力下锚固系统的横向振动检测信号和锚孔周围的围岩塑性区分布规律。

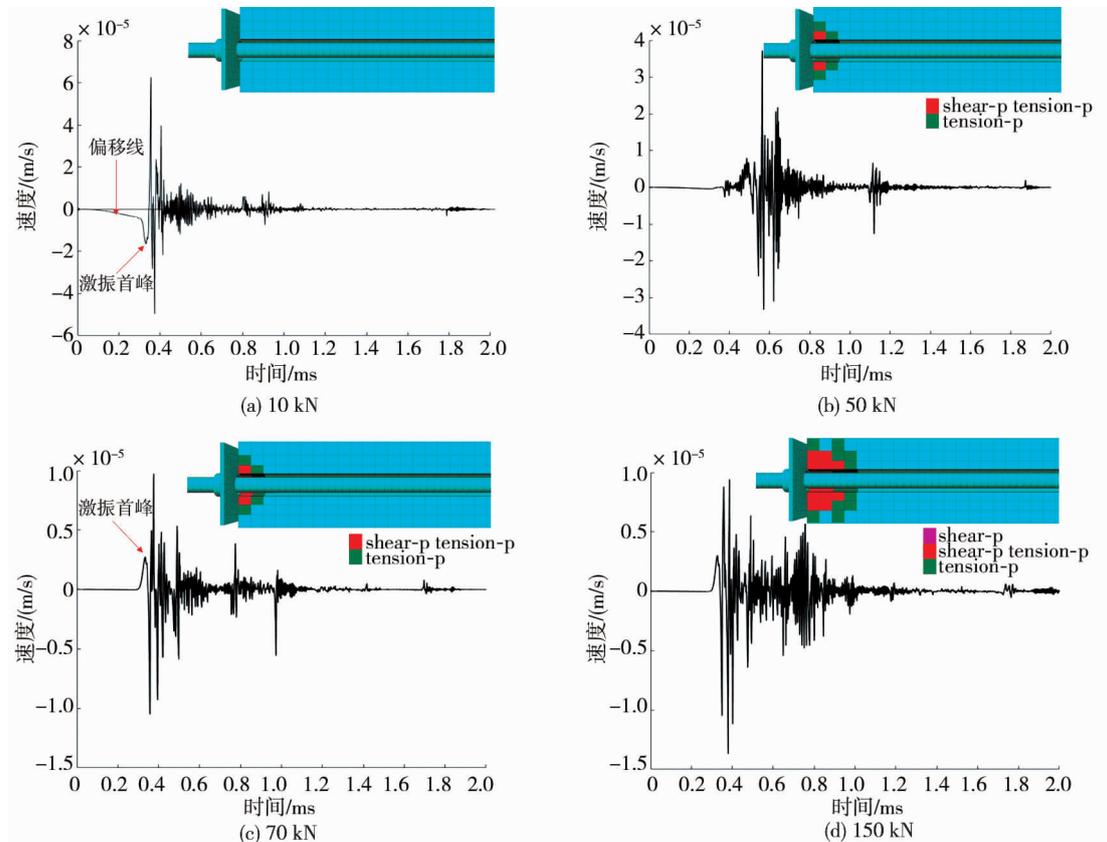


图 4 不同预紧力下锚杆时域检测信号和围岩塑性区分布

预紧力为 10 kN 时(如图 4a 所示),激振首峰振动方向与激振力作用方向为同向,锚孔周围的围岩未出现拉伸破坏,此时结构面未接近极限闭合量,可判断模型处于左端(托板与围岩连接处为左端,下同)弹性支承的状态.图 4a 中激振首峰前的监测曲线负相偏移证实了这一点,即 10 kN 预紧力下托板与围岩壁之间的静摩擦力小于激振幅值.根据检测信号,可将预紧力在 10 kN 的预应力模型判断为预紧力施加效果差。

预紧力为 70 kN 时(如图 4c 所示),激振首峰振动方向与激振力作用方向为反向,结构接触面的切向刚度会随着预紧力的增加而增加,从而使托板与围岩之间的相对滑动减少,激振能量损失也因此减小,引发激振首峰振幅随着预紧力增加而增加的现象.锚孔周围的围岩既有拉伸破坏又有连续的剪切破坏,此阶段结构面闭合量逐渐增大,结构接触面的刚度开始激增,锚固系统力学模型已经发生变化,可判断模型处于左端铰支状态.根据检测信号,可将预紧力在 70 kN 的预应力模型判断为预紧力施加效果好。

激振首峰振动方向的改变并非突然,由图4b可知,预紧力达到50 kN时,不能清楚地观察到激振力产生的特征首峰,此时预紧力施加效果介于差与好的过渡阶段.

当预紧力达到150 kN时(如图4d所示),锚孔周围的围岩体在压破坏与剪切破坏并存的区域中发育出了单纯剪切破坏的区域,说明围岩体超过极限抗剪强度.而从时域检测波形图中可以明显看出,预紧力为150 kN相较于预紧力为70 kN时的反射信号更强烈,这是由于岩体的破坏会造成信号不断反射,使监测到的信号更复杂.

## 2.4 预紧状态无损检测频域分析

仅凭时域检测信号分析锚杆横向振动特性不够精确,因此,将部分时域信号进行快速傅里叶变换,得到相应的频域信号,如图5所示.通过频域信号对不同预紧力锚固模型进行进一步分析.

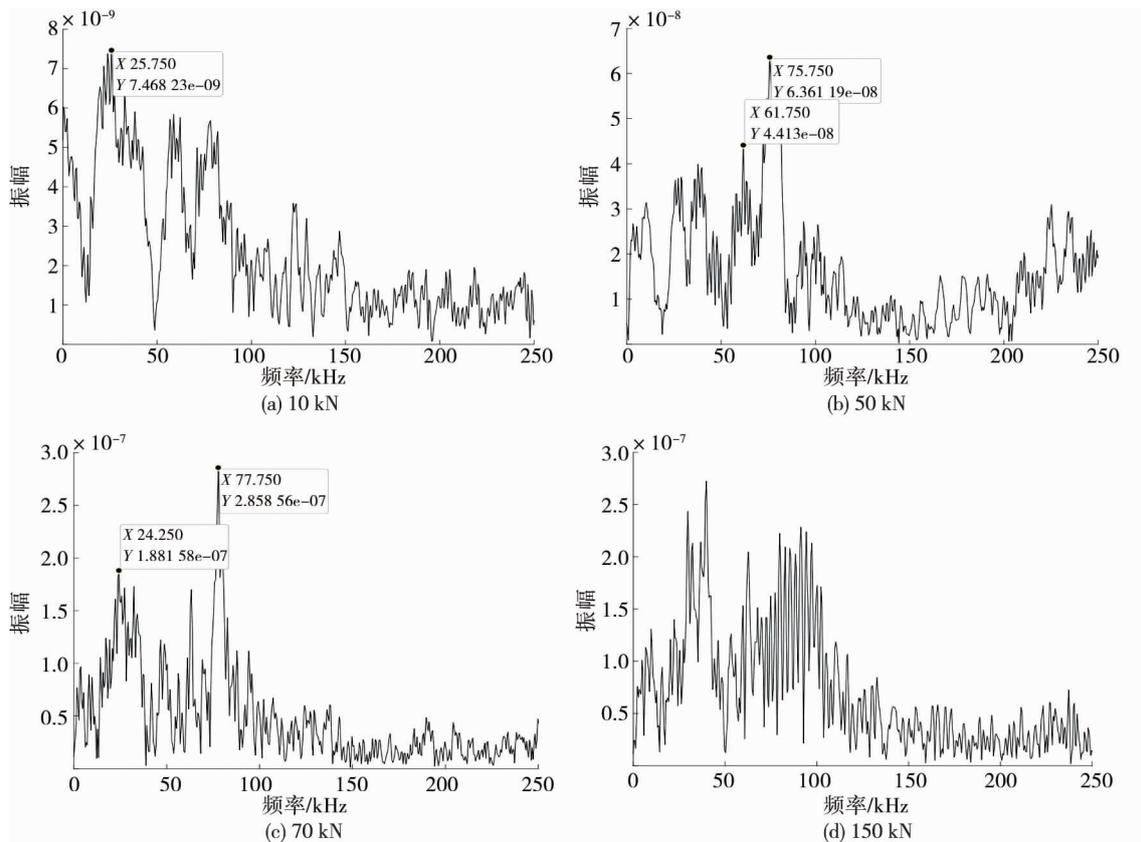


图5 不同预紧力下锚杆检测波形频域信号

如图5a所示,10 kN预紧力下的频域信号主频大小为25 750 Hz,频谱图的主频显现不明显,且频率分布复杂,造成这一现象的原因是应力波在传播过程中会出现频散等现象.由于此时托板与围岩之间结构面尚未接近闭合量,应力波的大部分能量被反射回来,而透射到周围围岩中的能量相对较小,所以将此时锚固系统评价为稳定性较差,锚杆预紧效果较差,需要对锚杆增加预紧力.

如图5b所示,50 kN预紧力下锚固系统的频域信号中出现了较为明显的主频.此时主频大小为75 750 Hz,虽然可以明显观察到主频的出现,但主频周围存在多个明显的次峰,主频幅值与次峰幅值的比为1:0.69,锚固系统相比10 kN预紧力时更稳定,所以将50 kN预紧力时的锚固系统评价为锚固系统稳定性较为良好,预紧效果良好.

如图5c所示,70 kN预紧力下锚固系统的频域信号中出现了极为明显的主频,70 kN预紧力时锚固系统主频为77 750 Hz.同时,此状态下频域信号中次峰幅值相对于主频幅值在逐渐减小,相较于预紧力为50 kN时,其主频幅值与次峰幅值的比从1:0.69增加到1:0.65,次峰幅值逐渐均衡,使主频相对单一突显,造成这一现象的原因是此时的锚固质量较好,应力波传播反射回来的能量较少,大部分能量都透射到

周围岩体,所以可将 70 kN 预紧力下的锚固系统评价为锚固系统稳定性优,锚杆预紧效果优。

如图 5d 所示,150 kN 预紧力下锚固系统的频域信号无明显主频,频散现象严重。结合图 4d 可知,此时锚孔周围的围岩体出现剪切破坏,围岩体超过极限抗剪强度,岩体的破坏会造成信号不断反射,使监测到的信号复杂,造成频域信号无明显主频。因此可判断锚杆所受预紧力过大,围岩体大量破坏,导致锚固系统稳定性下降。所以可将 150 kN 预紧力下的锚固系统评价为锚固系统稳定性差,锚杆所受预紧力过大。

综上分析发现:若能观察到锚固系统横向振动主频,且主频信号周围干扰信号较少,则说明锚固系统稳定性优、锚杆预紧效果优;若不能观测到主频信号,则可根据锚固系统横向振动频域信号的振动幅值判断锚杆预紧力的大小。若振动幅值大,则说明锚杆所受预紧力过大,可能导致围岩失稳;反之,则锚杆所受预紧力过小,导致锚杆没有起到主动承载的效果。因此针对不同的检测环境,通过辅助检测杆来控制锚杆外露端与传感的耦合状态,并选取相同特性的激发条件,便能通过频域分析来评价锚固系统的稳定性及锚杆的预紧效果。

### 3 预紧效果检测试验分析

预紧效果检测试验所用检测仪为 JL-MG(E) 锚杆质量检测仪,由采集仪、激振锤、检波器和分析处理软件组成。激振锤用于激发不同频率的弹性波,产生的弹性波沿着杆体传播并向锚杆周围辐射能量,检波器检测到反射回波,由检测仪内部分析处理软件对信号进行分析和存储。反射信号的能量强度和到达时间取决于锚杆参数和锚固情况。通过对信号进行处理和分析,可以确定锚杆整体质量。根据前述分析制作了与锚杆材料一致的辅助检测杆,检测杆长 1 m,直径 0.03 m。

将试件置于稳定等值的围压条件下,对锚固系统分别施加 5,7,10,12 MPa 的预应力,采用激振锤对辅助检测杆同方向进行横向敲击,同时通过检测仪获取锚固试件的时域响应信号,再将时域信号进行快速傅里叶变换转换为频域信号,如图 6 所示。

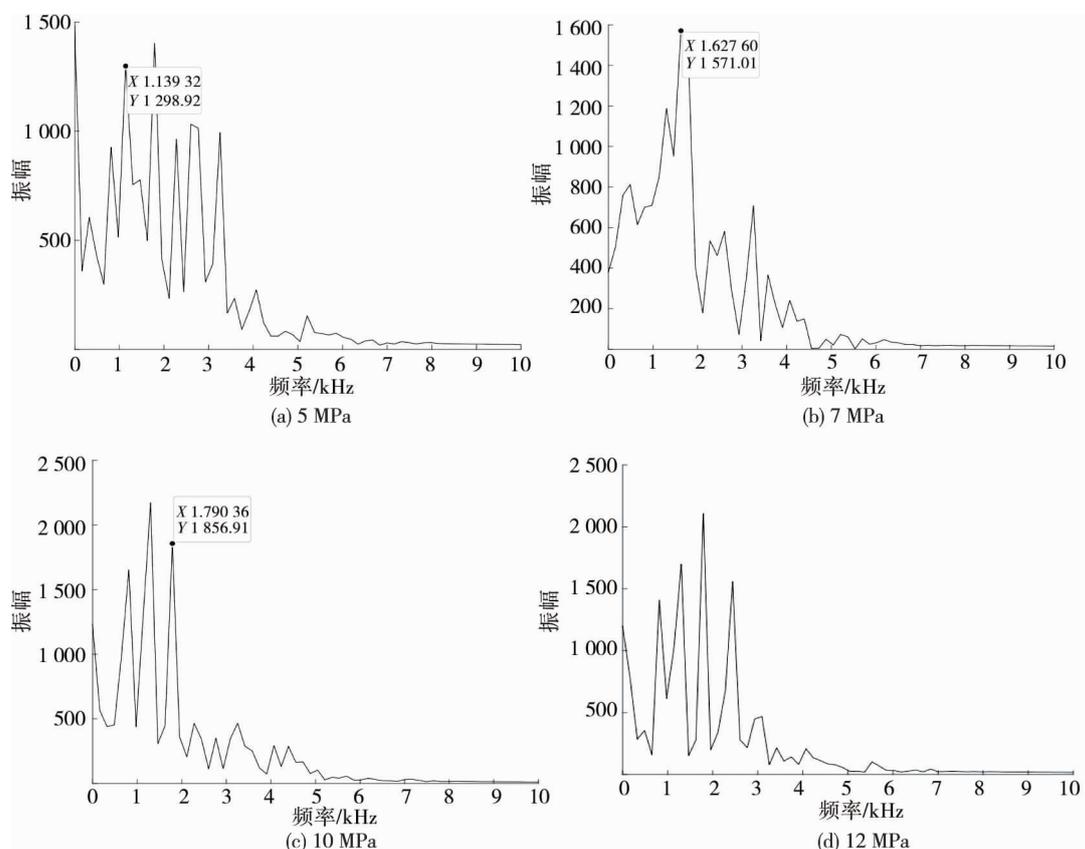


图 6 不同预应力下含辅助检测杆的锚杆频域检测信号

由图6可知:预应力为5 MPa时,主频为1 139 Hz,频域峰值信号的分布较为复杂,此时托板与试件之间的结构面尚未接近闭合量,应力波的大部分能量被反射回来,锚固系统的锚杆预紧效果较差,锚固系统稳定性较差,锚杆可主动承载的效果也较差;在预应力为7 MPa时,其频域峰值信号较为集中,主频为1 627 Hz,此时托板与试件间的接触结构面闭合量接近极值,结构接触面的法向刚度和切向刚度也接近极值,主频相对单一突显,锚固系统的锚杆预紧效果优,锚固系统稳定性优,锚杆可主动承载效果优;预应力升高为10 MPa时,频域信号又出现多个峰值,主频为1 790 Hz,结合前述分析可知此时锚固系统的锚杆预紧效果差,锚固系统稳定性差,锚杆主动承载的效果差;若继续施加预应力,当预应力达到12 MPa时,频域信号无明显主频,频散现象严重,此时可以从试件的破坏状态(图7)看出,裂缝首先在试件接触面(与托盘接触的面)产生,然后沿着接触面扩散,并向试件深部延伸,预应力发生骤减,锚固试块失稳。



图7 预应力为12MPa时试件的破坏状态

预紧效果试验结果与数值模拟结果是相同的,在预应力变化过程中,主频大小会随着预应力的增大而增大.但试验所得的主频与数值模拟所得的主频差距很大,这是因为数值模拟中的激发波属性与试验中的激发波属性不同所导致的.而本文只是利用不同预应力下锚固系统横向振动信号的频域特征对锚杆预紧的效果进行分析,对于主频大小不予考虑,所以试验的主频数值与数值模拟的主频数值的差异并不影响分析结果.

## 4 结论

- 1) 锚固结构系统横向振动固有频率与轴向受力有关,轴向力增大时锚固结构系统横向振动固有频率也会增大.
- 2) 在含辅助检测杆的锚杆时域信号中,激振首峰振动方向与激振力作用方向为同向时表明锚固系统预紧的效果较好.
- 3) 含辅助检测杆的锚杆频域信号存在主频集中现象,主频集中越显现表明锚固系统预紧的效果越好.

## 参考文献:

- [1] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展70年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
- [2] 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.
- [3] 汪明武,王鹤龄.锚固质量的无损检测技术[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):126-129.
- [4] 李青锋,谢雄刚,朱川曲.应力波在预应力锚杆内传播特性分析与工程应用[J].中国安全科学学报,2008,17(10):19-21.
- [5] 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.
- [6] 谷洪飞,李青锋,彭跃金,等.锚杆无损检测稳定波形的激振点和检测点[J].矿业工程研究,2019,34(2):12-17.
- [7] LIN Y F, YE J W, LO C M. Application of impact-echo method for rockbolt length detection[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316(17):125904.
- [8] 李青锋,缪协兴.基于应力波理论的锚杆支护无损检测机理与应用实践[M].南京:东南大学出版社,2015.
- [9] 薛道成.煤矿巷道锚杆无损检测技术及在西山矿区的应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [10] 张建业,李青锋.一种锚杆锚固长度无损检测物理滤波技术的数值模拟[J].矿业工程研究,2021,36(4):7-14.