

基于锚杆系统横向振动频率响应特征的轴力检测方法

王晓皓¹, 邢明录^{1, 2}, 于凤海^{1, 2}, 陈建崇³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

3. 鄂尔多斯市昊华红庆梁矿业有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:基于锚杆系统自由段横向振动特性的检测方法可实现对锚杆的大范围快速有效检测。为提升锚杆轴力检测精度,建立锚杆系统横向振动力学模型,测试了全尺寸锚杆系统轴向加载过程中的频率响应。结果表明:锚杆系统横向振动固有频率对转动刚度及锚杆自由段长度比较敏感;通过试验校准理论模型的转动刚度,所得理论预计轴力与试验结果的吻合度较好,频率阶次越低,轴力检测误差越小;轴力较低时,基频轴力检测的平均相对误差为5.8%,轴力较高时,平均相对误差仅为0.6%;当锚杆杆体进入塑性或界面脱粘滑移后,锚杆自由段长度变化较大,通过实时修正锚杆自由段长度,可实现锚杆系统损伤阶段的轴力检测,基频轴力检测的平均相对误差在4.1%以内。锚杆轴力的快速、无损检测方法对于支护系统及围岩稳定性评估具有重要意义。

关键词:锚杆系统;无损检测;锚杆轴力;振动模型;固有频率

中图分类号:TD353

文献标志码:A

Axial force detection method based on lateral vibration frequency response characteristics of rock bolt system

WANG Xiaohao¹, XING Minglu^{1, 2}, YU Fenghai^{1, 2}, CHEN Jianchong³

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Ordos Haohua Hongqingliang Mining Co. Ltd, Ordos 017000, China)

Abstract: The detection method based on the lateral vibration characteristics of the free segment of rock bolt system can quickly and effectively detect rock bolts on a large scale. To improve the accuracy of rock bolts axial force detection, this paper established a lateral vibration mechanical model for the rock bolt system and tested the frequency response of the full-scale rock bolt system during axial loading. The results indicate that the lateral vibration frequency of the rock bolt system is sensitive to the rotational stiffness and the free segment length of rock bolts. By calibrating the rotational stiffness of the theoretical model through experiments, the theoretical results obtained are in good agreement with the experimental results, and the lower the frequency order, the smaller the error in axial force detection. When the axial force is low, the average relative error of the fundamental frequency axial force detection is 5.8%, while when the axial force is high, the average relative error is only 0.6%. When the body of rock bolts enters plastic or interface debonding and sliding, the length of the free segment of the rock bolt changes significantly. By adjusting the length of the free segment of the rock bolt in real time, the axial force

收稿日期:2023-11-10

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022ME158)

作者简介:王晓皓(1998—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事锚杆支护检测方法研究。

邢明录(1986—),男,山东菏泽人,实验师,主要从事锚杆性能测试与锚固支护理论研究,本文通信作者。

E-mail:sixingziwei@163.com

detection during the damage stage of the rock bolt system can be achieved, and the average relative error of the fundamental frequency axial force detection is within 4.1%. The rapid and non-destructive testing method of the rock bolt axial force is of great significance for the evaluation of support system and surrounding rock stability.

Key words: rock bolt system; non-destructive testing; axial force of rock bolt; vibration model; natural frequency

锚杆支护作为我国煤矿巷道主体支护方式,具有安全可靠、方便快捷、经济合理等优势,从服务年限较长、受采动影响小的大巷、硐室到服务时间短、受动压影响大的回采巷道,从全煤巷道到半煤岩巷、岩巷,从浅部巷道到深部高应力巷道等,涵盖了我国煤矿的各种巷道类型^[1-2]。锚杆支护作为一种隐蔽工程,测试其受力的状态对改进巷道支护设计和预测围岩稳定具有显著的工程意义^[3]。

目前,现场锚杆受力监测多使用锚杆测力计、应变片测力锚杆和光纤光栅测力锚杆等,类似测试手段仅限于小范围的锚杆轴力监测^[4-6]。锚杆系统的振动响应可分为纵向振动和横向振动,其中锚杆纵向振动特性的研究取得了较大进展,利用锚杆纵向振动特性可以对锚杆锚固长度、自由段长度、锚固缺陷位置等进行无损检测,检测结果的准确性被普遍认可^[7-8]。基于锚杆系统横向振动特性的轴力无损检测方法,通过外力激振锚杆外露段使之产生振动响应,借助布设在锚杆或其连接件上的加速度传感器接收振动信号,利用锚杆系统固有频率随锚杆轴向受力变化的特性,可快速、大范围地进行锚杆轴力检测^[9]。薛道成等^[10]建立了锚杆锚固结构动力学模型,指出锚杆各阶横向振动频率均与锚杆轴力正相关。Ivanovic等^[11]提出一种新的计算模型,将灌浆刚度和长度比的变化引入模型,并采用数值计算获得轴力对锚固系统频率响应的影响。理论分析表明,锚杆系统的固有频率既不依赖振动幅度,也不受激振频率的影响,证明了基于锚杆振动频率对轴力进行检测的可行性^[12]。但在实际应用中,不同激振方式采集的信号质量相差很大,给固有频率识别带来困难,同时锚杆边界条件对系统振动特性也有很大影响^[13]。王宇赛等^[14]分别对螺母和托盘构件进行了振动特性研究,获得了螺母和托盘的振动频率与轴力的关系。Xing等^[15]将频谱、能量比等信号输入神经网络,利用遗传算法优化神经网络来预测锚杆轴力,可以实现较小的测量误差。

现阶段,锚杆系统横向振动无损检测的研究多针对处于弹性阶段的锚杆,对锚杆屈服强化及锚固界面失效滑移等损伤阶段的振动特性研究较少,缺乏从锚杆系统初始承载至最终失效的全周期受力的系统研究。基于此,本研究将锚杆系统简化为两端铰支的欧拉-伯努利梁横向振动模型,在模型两端边界处附加扭转弹簧来控制其转动刚度,模拟介于“固定”和“铰支”之间的边界约束条件,并基于该理论模型开展全尺寸锚杆系统轴向承载室内试验,分析锚杆系统初始承载至最终失效的全周期轴力与振动频率之间的关系,为高效准确检测锚杆轴力提供理论与试验基础。

1 锚杆横向振动特性理论分析

1.1 锚杆横向往振动力学模型

图1所示为锚杆轴力无损检测示意图,锚杆系统分为锚固段、自由段和外露段。在锚固段,锚杆通过锚固剂与围岩粘结;在自由段,假设锚杆杆体与围岩钻孔壁之间不接触;在外露段,锚杆通过托盘与巷道围岩表面接触,围岩变形时通过托盘、螺母对锚杆施加轴力。轴力测量时,通常将感应锚杆振动特性的加速度传感器固定于锚杆外露段的螺母或托盘上,通过横向激振外露段锚杆获得锚杆系统自由衰减振动的加速度响应数据,进而根据理论模型计算锚杆轴向受力状态。

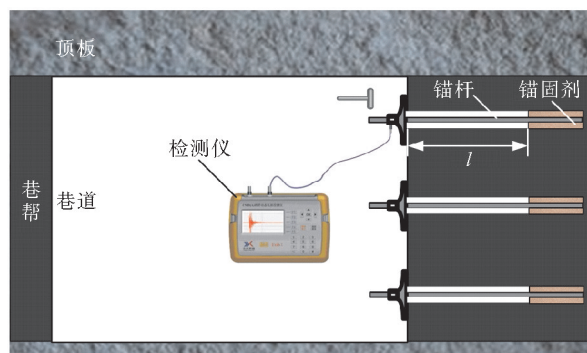


图1 锚杆轴力无损检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-destructive testing for axial force of rock bolts

锚杆系统与围岩的接触条件对锚固系统的振动特性有很大影响,接触条件即为理论模型的边界条件。锚杆梁模型两端介于固支和简支之间,因此将锚固段、锚杆托盘-围岩接触面对锚杆横向振动的影响简化为固定、滑动铰支座,同时采用扭簧控制锚杆两端的转动刚度,如图 2 所示。图中 l 为锚杆自由段杆长, F 为锚杆所受轴力, K_1 、 K_2 分别为锚杆锚固段、锚杆-托盘-围岩接触面的转动刚度。

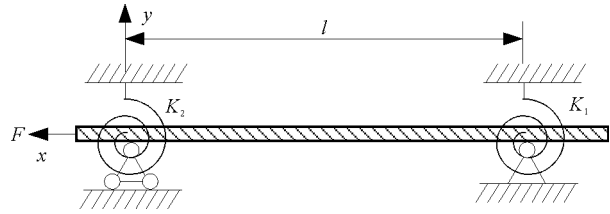


图 2 锚杆横向振动力学模型

Fig. 2 Mechanical model of lateral vibration of rock bolts

1.2 锚杆系统横向振动微分方程求解

当外力产生扰动较小时,锚杆将作小幅度横向振动响应。对于如图 2 所示的锚杆横向振动力学模型,将锚杆中轴线取作 x 轴,与 x 轴垂直的方向取作 y 轴,锚杆作横向振动时只有沿 y 轴的横向位移 $y(x, t)$ 。由于模型纵向长度远大于横向长度,可以忽略截面的剪切变形和截面绕中轴线转动的惯性效应,根据 Euler-Bernoulli 梁理论,可得轴力作用下锚杆系统横向自由振动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - F \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: E 为锚杆弹性模量; I 为锚杆截面的二次矩; ρ 为锚杆密度; A 为杆体横截面积。

式(1)中含 $y(x, t)$ 对空间变量 x 的二阶、四阶偏导数和对时间变量 t 的二阶偏导数,求解时需列出 4 个边界条件。

将振动方程的解分离变量,并代入式(1)得:

$$\frac{\ddot{q}(t)}{q(t)} = \frac{EI\phi^{(4)}(x) - F\phi''(x)}{\rho A\phi(x)} \quad (2)$$

式中: $\phi(x)$ 为振型函数; $\phi(x)$ 和 $q(t)$ 满足方程 $y(x, t) = \phi(x)q(t)$ 。

式(2)两边为不同自变量的函数,只可能与常数相等,记作 $-(2\pi f)^2$, f 为系统固有频率,可导出:

$$\ddot{q}(t) + (2\pi f)^2 q(t) = 0 \quad (3)$$

$$\phi^{(4)}(x) - \frac{F}{EI}\phi''(x) - \frac{\rho A(2\pi f)^2}{EI}\phi(x) = 0 \quad (4)$$

式(4)的通解为:

$$\phi(x) = C_1 \sin(\beta_1 x) + C_2 \cos(\beta_1 x) + C_3 \operatorname{sh}(\beta_2 x) + C_4 \operatorname{ch}(\beta_2 x) \quad (5)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\sqrt{(2\pi f)^2 \frac{\rho A}{EI} + \left(\frac{F}{2EI}\right)^2} - \frac{F}{2EI}}, \beta_2 = \sqrt{\sqrt{(2\pi f)^2 \frac{\rho A}{EI} + \left(\frac{F}{2EI}\right)^2} + \frac{F}{2EI}} \quad (6)$$

式中: C_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 为积分常数。

根据式(6)可得锚杆系统各阶固有频率 f_i 为:

$$f_i = \frac{(\beta_1)_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A} \left[1 + \frac{F}{(\beta_1)_i^2 EI} \right]} \quad (7)$$

积分常数 C_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 及锚杆轴力 F 和系统固有频率 f 应满足的频率方程由边界条件确定,分析图 2 所示锚杆系统力学模型可知,锚杆两端挠度为 0,弯矩与弹簧约束力矩相等,其边界条件为:

$$\begin{cases} x=0, \phi(x)|_{x=0} = 0, EI \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} \Big|_{x=0} = K_1 \frac{dy(x)}{dx} \Big|_{x=0} & (\text{锚固端}), \\ x=l, \phi(x)|_{x=l} = 0, EI \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} \Big|_{x=l} = -K_2 \frac{dy(x)}{dx} \Big|_{x=l} & (\text{托盘端}). \end{cases} \quad (8)$$

将边界条件代入式(5),可以得到 C_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 非零解的条件为:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -EI\beta_1^2 & -K_1\beta_1 & EI\beta_2^2 & -K_1\beta_2 \\ \cos(\beta_1 l) & \sin(\beta_1 l) & \text{ch}(\beta_2 l) & \text{sh}(\beta_2 l) \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中： $B_1 = -EI\beta_1^2 \cos(\beta_1 l) - K_2\beta_1 \sin(\beta_1 l)$ ； $B_2 = K_2\beta_1 \cos(\beta_1 l) + EI\beta_1^2 \sin(\beta_1 l)$ ； $B_3 = EI\beta_2^2 \text{ch}(\beta_2 l) + K_2\beta_2 \text{sh}(\beta_2 l)$ ； $B_4 = EI\beta_2^2 \text{sh}(\beta_2 l) + K_2\beta_2 \text{ch}(\beta_2 l)$ 。

对式(9)进行化简后可得到与 β_1 有关的频率方程,进而结合式(7)可以得到轴力 F 与各阶固有频率 f_i 的关系式为:

$$F = \frac{(2\pi f_i)^2 \rho A}{(\beta_1)_i^2} - (\beta_1)_i^2 EI \quad (10)$$

根据式(9)和式(10),给定锚杆的几何尺寸(l, A, ρ)、力学性能(E 和 I)以及锚固段转动刚度 K_1 和锚杆-托盘-围岩接触面转动刚度 K_2 ,即可通过锚杆系统的固有频率计算出锚杆所受轴力。

为分析锚杆系统固有频率与转动刚度 K_1, K_2 以及长度 l 的关系,取锚杆参数: $E=200 \text{ GPa}$,直径 $d=20 \text{ mm}$, $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ 。将上述参数代入式(9)和式(10)中,利用 MATLAB 软件对其进行求解计算,获得不同转动刚度 K_1, K_2 和长度 l 对锚杆系统横向振动基频(1阶固有频率)的影响,如图3所示。

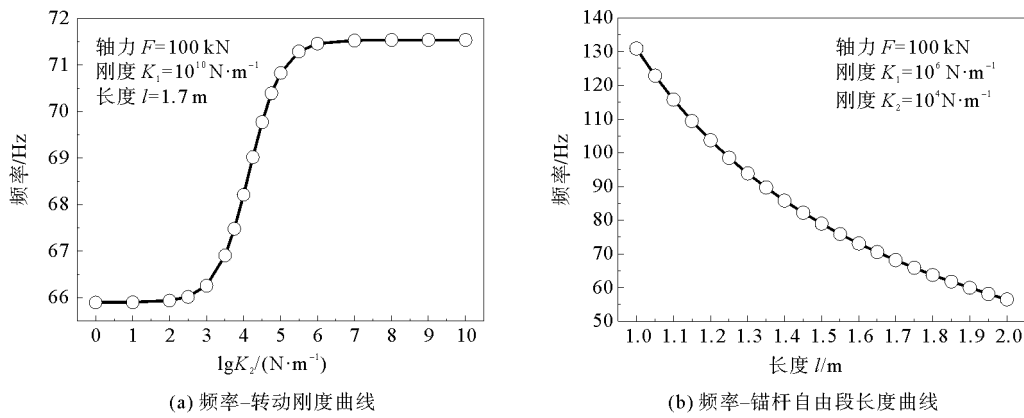


图3 不同转动刚度和锚杆自由段长度对系统固有频率的影响

Fig. 3 Influence caused by different rotational stiffness and free segment length of rock bolts on the natural frequency of the system

从图3中可以看出,锚杆系统固有频率随着转动刚度增加而增大,随着锚杆自由段长度增加而减小。由图3(a)可知,当转动刚度在 $10^3 \sim 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,系统固有频率随 $\lg K_2$ 增加而快速增大;当转动刚度小于 $10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 或大于 $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,系统固有频率受刚度 K_2 变化影响较小。由于该力学模型具有对称性,系统固有频率受转动刚度 K_1 的影响与转动刚度 K_2 相同。由图3(b)可知,长度 l 变化对锚杆系统固有频率影响较大,随长度增加,频率减小速度呈先快后慢的趋势,长度增加 1 m ,频率减少 74.53 Hz 。

2 锚杆轴力无损检测室内试验

2.1 锚固试样

考虑巷道围岩锚杆支护工况特征,将“锚杆-锚固剂-围岩”简化为单独结构,制备锚杆锚固体试件,在实验室测试锚杆受激振下的横向振动特性。围岩的制作原材料包括粒径小于 4 mm 的细砂、42.5R 普通硅酸盐水泥、粒径均匀的石子和清水,其质量配比为水:水泥:细砂:石子= $0.45:1:2:1.5$ 。制备锚固基体时,将各配比材料搅拌均匀后倒入直径 300 mm 、高 600 mm 的模具中(模具中心预留锚固孔),脱模养护试件 14 d 后,使用砂浆锚固剂对锚杆试件进行锚固,继续养护锚固体试件 14 d 后开展试验,锚固体试件制备

成品如图 4 所示。锚杆选用直径 20 mm、长 2 400 mm 的 MG400 型左旋螺纹钢锚杆,锚固长度 600 mm、自由段长度 1 700 mm、螺纹段 100 mm。测得锚杆杆体的弹性模量为 200 GPa,屈服强度为 445 MPa,抗拉强度为 637 MPa。

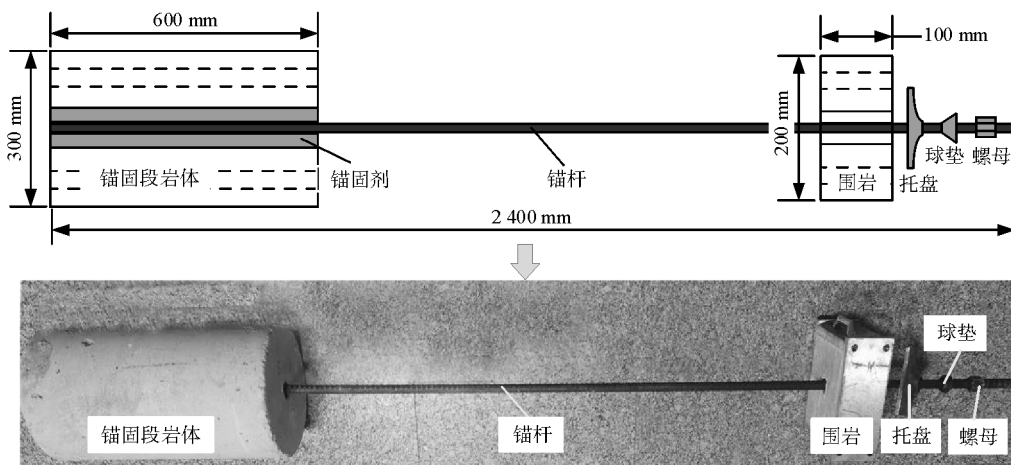


图 4 全尺寸锚杆系统试件

Fig. 4 Specimen of full-scale rock bolt system

2.2 试验方案

为研究锚杆轴向受力与锚杆锚固系统横向振动特性之间的关系,基于自主研发的 CNBT-3122 型全尺寸锚杆锚固性能试验机,搭建了全尺寸锚杆轴力无损检测试验系统。如图 5 所示,该试验系统包括加载系统、锚杆振动检测系统和吊装系统。加载系统最大拉伸载荷为 1 000 kN,最大拉伸行程可达 550 mm;锚杆振动信号检测系统包括 DHDAS-5923 动态应变仪和 DH131E 加速度传感器。由于试样尺寸、重量较大,锚固试件安装采用行吊装置辅助进行。

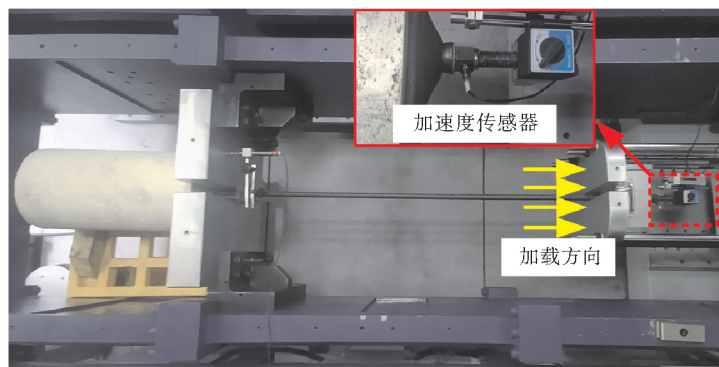


图 5 全尺寸锚杆系统轴力无损检测试验系统

Fig. 5 Non-destructive testing system for axial force of full-scale rock bolt system

采用锚杆锚固性能试验机对锚固试件进行轴向拉伸加载,模拟锚杆使用过程中轴向受力的变化。为分析锚杆系统轴向拉伸的全周期横向振动特性,在锚杆弹性阶段,试验机采用力控的方式,以 100 N/s 的速度对锚杆施加轴向力至 100 kN;之后采用位移控制,以 5 mm/min 的加载速度对锚杆施加拉伸位移加载,直至锚杆进入屈服强化及界面失效滑移阶段。力控阶段间隔 5 kN、位移控制阶段间隔 10 mm,使用力锤敲击外露段锚杆,触发加速度传感器采集锚杆系统振动信号。

3 锚杆系统横向振动频率响应分析

3.1 锚杆横向振动信号特征

固有频率由系统本身决定,与系统受激发生自由振动时的共振频率相等,体现在频域曲线上则是某点的振幅骤增,该点即代表系统的固有频率。图 6(a)~6(d)分别为 10、30、60 和 100 kN 轴力下锚杆系统频谱图,图中 $f_i (i=1,2,\dots,7)$ 对应的横坐标分别为锚杆系统的 1~7 阶固有频率。从图 6 中可以发现,前 7 阶固有频率中,1~4 阶固有频率相对 5~7 阶固有频率振幅较大,易于识别,其中基频对应着锚杆系统最基本的振动模式。5~7 阶固有频率频谱曲线振幅较小,且在固有频率附近会出现多个峰值频率,造成频率识别困难,对应的固有频率容易出现误判。随锚杆轴力增加,频谱曲线更加稳定,多峰现象减少,更容易识别,各阶固有频率均随轴力增加而增大。

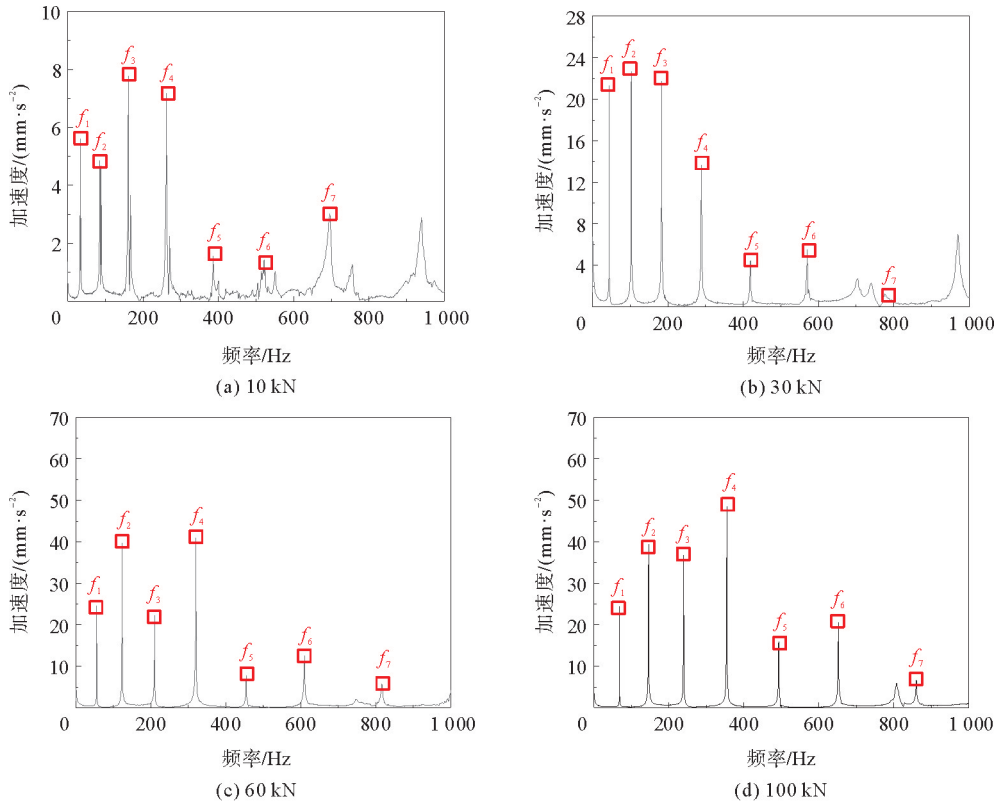


图 6 不同锚杆轴力下的频域信号

Fig. 6 Frequency domain signals under different axial forces of rock bolts

3.2 各阶固有频率响应分析

试验测得的前 7 阶固有频率与锚杆轴力的关系曲线如图 7 所示,可以看出锚杆系统的固有频率与锚杆轴向受力正相关,基频由 31.13 Hz 增加到 68.36 Hz,相对增幅为 119.6%;3 阶固有频率从 156.25 Hz 增加到 239.26 Hz,相对增幅为 53.2%;5 阶固有频率由 394.89 Hz 增加到 493.16 Hz,相对增幅为 19.9%;7 阶固有频率由 750.73 Hz 增加到 859.99 Hz,相对增幅为 14.6%;随着频率阶次的增加,频率增长的相对幅度越来越小,证明其对轴力响应的敏感度逐渐降低。

图 8 为锚杆轴力 30 kN 时,试验测得的锚杆系统 1~7 阶固有频率与理论计算得出的固有频率的对比分析图,图中理论计算参数(转动刚度)由试验测得的基频标定得出。从图 8 中可以看出,试验与理论得到的系统 1~7 阶固有频率差别较小,最大相对误差小于 3%,表明所采用的简化理论模型计算的频率与试验结果吻合较好。

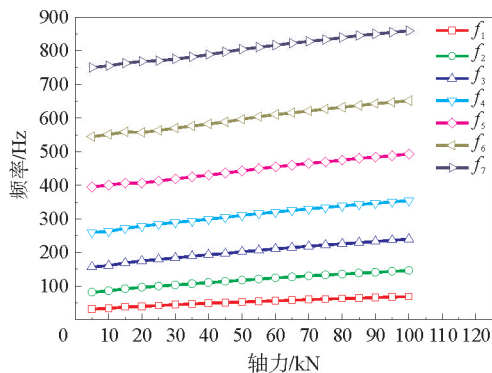


图7 各阶固有频率-轴力关系曲线

Fig. 7 Curves of the relationship between each order natural frequency and axial load

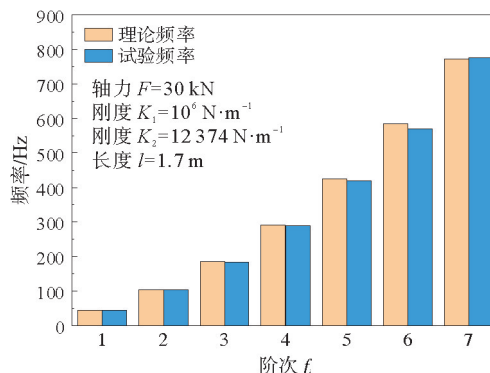


图8 各阶固有频率试验与理论结果对比

Fig. 8 Comparison between theoretical frequencies and experimental frequencies of each order

4 锚杆轴力检测方法

4.1 锚杆系统弹性状态下的轴力检测

一般情况下,锚固段近似为固定约束,其转动刚度 K_1 远大于锚杆托盘-围岩接触面转动刚度 K_2 ,取 $K_1 = 10^6 \sim 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,此时理论计算模型除锚杆轴力和固有频率外仅剩1个未知量(K_2)。 K_2 可以通过1组已知的轴力、固有频率数据进行标定,室内试验中可以直接通过试验机等仪器获取轴力、固有频率数据,而在现场应用中可以通过锚杆测力计和无损检测仪获得1组轴力和固有频率数据对 K_2 进行标定。取 $K_1 = 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,以锚杆轴力 30 kN 及其测得的基频 44.56 Hz,标定 $K_2 = 12\,374 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,进而得到锚杆系统 0~100 kN 轴力-基频曲线,并与试验测得的轴力-基频曲线对比分析,如图 9(a)所示。图中理论轴力曲线与

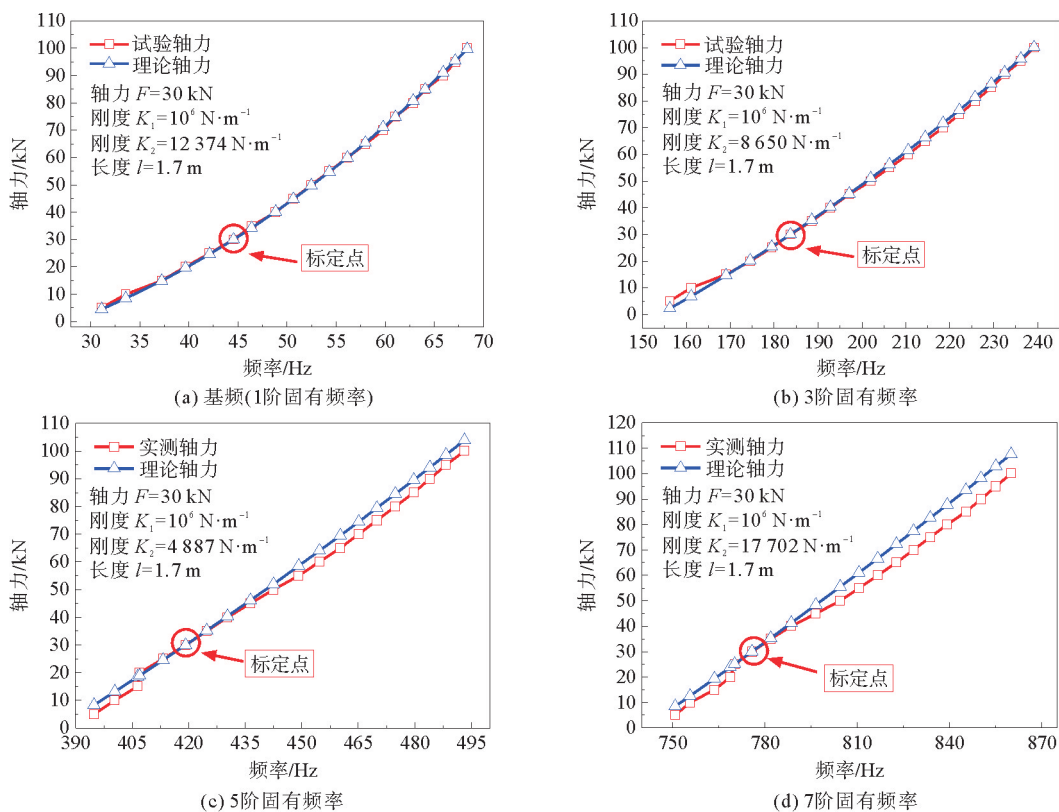


图9 理论计算轴力与锚杆实际受力对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of theoretical calculation axial force and actual force on rock bolts

试验轴力近似重合,当锚杆轴力为 10 kN 时,最大相对误差为 15.5%,平均相对误差为 5.8%;当锚杆轴力不小于 30 kN 时,轴力检测最大相对误差仅为 1.4%,平均相对误差为 0.6%。

图 9 为根据不同阶次频率得到的理论轴力与试验轴力对比分析,表 1 为理论轴力与试验轴力的相对误差。可以看出,在低轴力下,理论轴力与试验轴力误差较大;而高轴力下,二者误差较小。以标定点 30 kN 为界,分析 0~30 kN、30~100 kN 两个阶段的最大相对误差及平均相对误差。检测结果的平均相对误差和最大相对误差都随着固有频率阶次的增加而增大,使用高阶频率检测轴力的精度相对降低。30~100 kN 阶段轴力检测最大相对误差和平均相对误差远小于 0~30 kN 阶段,即对处于弹性阶段的锚杆而言,高轴力阶段的检测结果精度更高。究其原因,锚杆轴力较低时,锚固系统处于边界约束不稳定状态,例如托盘与围岩接触面摩擦力较小,在检测敲击过程中,锚杆端头可能出现刚性位移,导致低轴力阶段的检测误差普遍偏大。

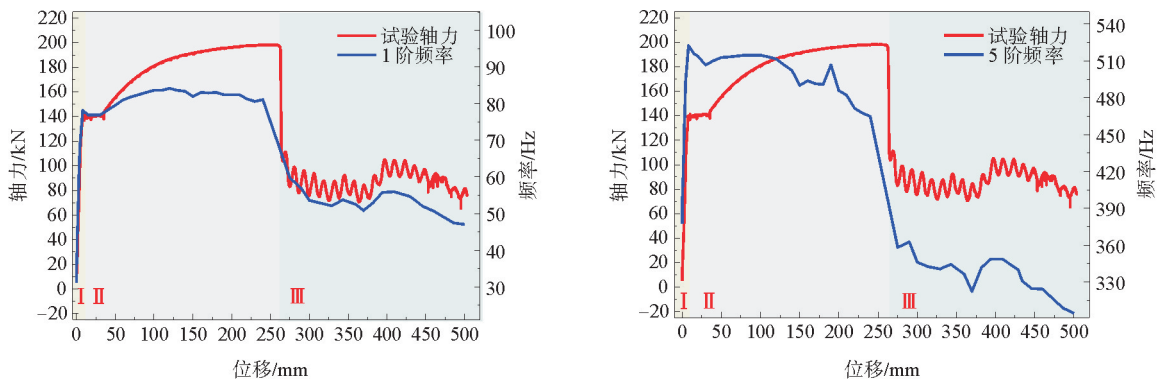
表 1 理论轴力与试验轴力误差

Table 1 Error between theoretical axial force and experimental axial force

阶次	0~30 kN		30~100 kN	
	最大相对误差/%	平均相对误差/%	最大相对误差/%	平均相对误差/%
1 阶	15.5	5.8	1.4	0.6
3 阶	54.8	18.3	2.5	1.4
5 阶	67.2	25.8	6.9	4.3
7 阶	70.0	29.1	11.2	8.1

4.2 锚杆系统损伤状态下的轴力检测

锚杆系统的主要损伤可以归结为锚杆杆体塑性损伤及锚固界面滑移损伤两种。如图 10 所示,锚杆塑性变形损伤和锚固界面滑移损伤阶段,系统固有频率变化与锚杆轴力变化趋势差别较大。根据理论模型,锚杆轴力增加,系统固有频率也随之增大,但在锚杆塑性损伤阶段,随着拉拔位移的增加,锚杆轴向受力逐步增加,系统固有频率反而出现增长减缓甚至减小的情况;当锚固失效、锚杆发生滑移时,锚杆轴力快速下降,系统固有频率大幅度减小。锚杆系统损伤阶段轴力与系统固有频率曲线变化差异的主要原因在于锚杆自由段长度的变化,由式(9)和图 3(b)可知,系统固有频率与锚杆自由段长度 l 有关,相同条件下锚杆自由段长度越长,系统的固有频率越小。锚杆属于塑性材料,杆体屈服变形及锚固界面滑移都会导致锚杆自由段长度增加,锚杆轴向受力过程中,其自由段长度的变化对系统振动特性及轴力检测具有重要影响。



(a) 基频(1阶固有频率)

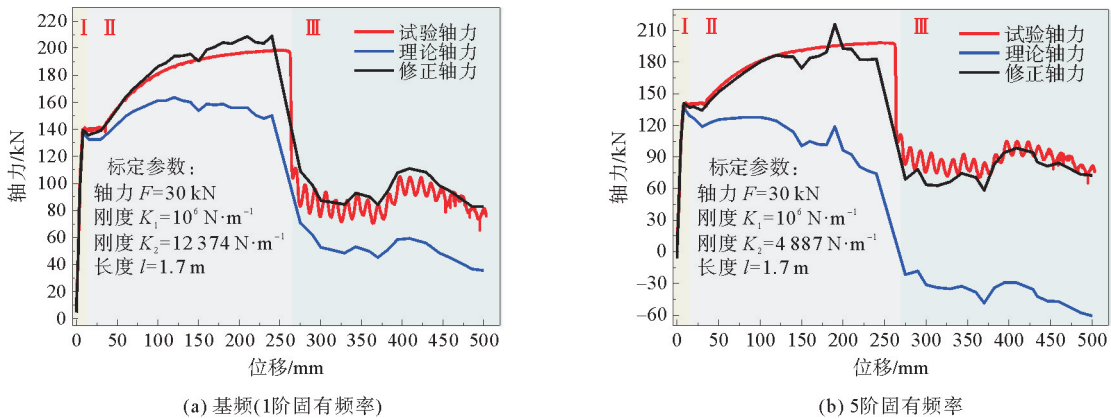
(b) 5阶固有频率

I—锚杆弹性阶段; II—锚杆塑性损伤阶段; III—锚固界面滑移损伤阶段

图 10 锚杆受力和频率随拉伸位移变化曲线

Fig. 10 Curve of force and frequency variation of rock bolts with tensile displacement

为了进一步研究锚杆自由段长度变化对轴力检测的影响,将理论计算得到的锚杆全周期轴力与锚杆实际受力进行对比分析,如图 11 所示。从图中可以看出,在锚杆系统损伤阶段,仅考虑频率变化得到的理论计算轴力明显小于试验结果。这是因为在损伤阶段,锚杆自由段的长度变化较大,根据 1.2 节的理论分析,在相同的轴力下,锚杆自由段的长度越长,系统的固有频率就越低。因此,如果忽略了损伤阶段锚杆的伸长,会导致理论计算轴力偏小。为了避免锚杆自由段伸长带来的误差,每次计算理论轴力时,须实时更新锚杆自由段长度,从而得到修正后的理论轴力检测曲线。在室内试验中,锚杆自由段长度的实时变化可通过试验机拉拔位移直接获得,而在现场应用中则可通过锚杆纵向振动无损检测方法得到锚杆锚固长度以及锚杆自由段长度^[16]。以锚杆起始屈服及界面滑移为分界点,在此之前,锚杆系统处于弹性阶段,锚杆自由段长度随载荷的变化量可忽略不计;在此之后,需要实时修正锚杆自由段长度以获得正确的轴力检测结果。



I — 锚杆弹性阶段; II — 锚杆屈服强化阶段; III — 锚固界面失效滑移阶段

图 11 全周期理论轴力检测结果与锚杆实际受力对比曲线

Fig. 11 Comparison curves between the full-cycle theoretical axial force and the actual stress of rock bolts

由图 11 可以看出,考虑锚杆自由段长度变化后的修正轴力曲线大大减小了与锚杆实际受力的误差,1 阶和 5 阶固有频率计算得到的检测结果与锚杆实际受力最大相对误差分别为 13.3%、34.5%,平均相对误差分别为 4.1%、7.9%。在锚杆系统弹性阶段和损伤阶段,基于锚杆系统横向振动特性的轴力检测方法具有较高的检测精度,使用低阶固有频率检测误差小于高阶固有频率,基频检测误差最小。

5 结论

通过建立锚杆系统横向振动动力学模型,开展了全尺寸锚杆系统横向振动特性试验,获得了锚杆系统固有频率与锚杆轴力的对应关系,提出了锚杆轴力全周期检测方法,主要结论有:

1) 试验测得的前 7 阶固有频率中,1~4 阶固有频率振幅较大,容易识别;5~7 阶固有频率频谱曲线波动较大,在固有频率附近会出现多个峰值频率,造成固有频率识别困难;锚杆系统各阶固有频率随轴力增加而增加,呈抛物线关系;固有频率阶次越高,其对锚杆轴力的敏感度越低。

2) 当锚杆系统处于弹性阶段时,通过分析 0~100 kN 试验轴力和理论轴力检测结果的相对误差发现,在较低轴力(0~30 kN)时,检测结果误差偏大,高轴力(30~100 kN)时,误差较小;检测误差随着固有频率阶次的增加而增大,基频检测精度最高。

3) 锚杆自由段长度对锚固系统横向振动频率具有较大影响,在锚固系统损伤阶段,不能忽视锚杆杆体塑性变形及界面滑移造成的锚杆自由段长度变化;采用实时修正锚杆自由段长度的方法,所得基频轴力检测平均相对误差为 4.1%,证明所用理论模型可实现对锚杆系统从初始承载至最终失效的全周期轴力的识别、检测。

参考文献:

- [1] 康红普. 煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 1-11.
KANG Hongpu. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 1-11.
- [2] 李国锋, 王九红, 刘建荣, 等. 巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 47-55.
LI Guofeng, WANG Jiuhong, LIU Jianrong, et al. Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(4): 47-55.
- [3] ZHAO T B, ZHANG Y B, LI C C. Radial stiffness of rock bolt samples and required thickness of the steel tube in impact tests[J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 146(2). DOI: 10.1016/j.ijrmmms. 2021. 104886.
- [4] SONG G B, LI W J, WANG B, et al. A review of rock bolt monitoring using smart sensors[J/OL]. Sensors, 2017, 17(4). DOI: 10.3390/s17040776.
- [5] 潘立志, 赵同彬, 邢明录, 等. 矿用碟形托盘压缩变形及承载特性研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 53-61.
PAN Lizhi, ZHAO Tongbin, XING Minglu, et al. Research on compression deformation process and load-bearing characteristics of saucer tray used in mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Sciences), 2023, 42(2): 53-61.
- [6] 梁敏富, 方新秋, 陈宁宁, 等. 正交试验设计的FBG测力锚杆结构封装优化及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2950-2960.
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2950-2960.
- [7] 张雷. 非全长锚杆锚固缺陷无损检测原理及方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
ZHANG Lei. Investigation on principle and method of the nondestructive testing of anchorage defects in partial-cohesive bolts[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [8] BACIC M, KOVACEVIC M S, KACUNIC D J. Non-destructive evaluation of rock bolt grouting quality by analysis of its natural frequencies[J/OL]. Materials, 2020, 13(2). DOI: 10.3390/ma13020282.
- [9] LI C M, XIA X, FENG R M, et al. Experimental study of the effect of axial load on stress wave characteristics of rock bolts using a non-destructive testing method[J/OL]. Sustainability, 2022; 14(15). DOI: 10.3390/su14159773.
- [10] 薛道成, 张凯. 煤矿锚杆锚固结构系统横向振动特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 695-700.
XUE Daocheng, ZHANG Kai. Theoretical research on transverse vibrations of the bolt anchorage structure in coal mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 695-700.
- [11] IVANOVI A, NEILSON R D. Non-destructive testing of rock bolts for estimating total bolt length[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64(12): 36-43.
- [12] BRNS M, THOMSEN J J, SAH S M, et al. Estimating bolt tension from vibrations: Transient features, nonlinearity, and signal processing[J/OL]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150. DOI: 10.1016/j.ymssp. 2020. 107224.
- [13] 郝阳, 吴宇, 张凯, 等. 煤矿锚杆轴力检测时锚固系统振动特性参数分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 567-575.
HAO Yang, WU Yu, ZHANG Kai, et al. The analysis of vibration frequency parameter of rock bolt anchorage system during axial force testing in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 567-575.
- [14] 王宇赛, 张凯, 肖方园, 等. 基于锚杆构件振动响应特征的锚杆轴力无损检测方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 119-126.
WANG Yusai, ZHANG Kai, XIAO Fangyuan, et al. Non-destructive testing method of anchor rod axial force based on vibration response characteristics of anchor rod components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 119-126.
- [15] XING H, SUN X Y, WANG M M, et al. Application of EEMD and neural network in stress prediction of anchor bolt[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2018, 57(2): 157-166.
- [16] 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. Nondestructive Testing of parameters of bolt anchoring state and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1741-1744.