

# 锚固结构爆破振动规律与损伤的模型试验

周纪军<sup>1</sup>, 汪小刚<sup>1</sup>, 贾志欣<sup>1</sup>, 孔祥松<sup>2</sup>, 夏宇<sup>2</sup>, 耿慧辉<sup>2</sup>, 刘立鹏<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 选用水泥砂浆和玻璃钢分别模拟岩石和锚杆, 进行物理模型试验, 结合理论分析和实践, 研究锚固结构不同部位在掏槽爆破作用下的振动规律与损伤, 并结合小波包分析, 对动应变信号进行深层次的分解分析。结果表明: 在爆破作用下, 对于邻近工作面的一排锚杆, 其锚固段和自由段的振动规律在频率、幅值、持续时间和波形方面明显不同, 此排锚杆的振动能量大, 但频带较宽, 能量分散; 随着离工作面距离的增加, 锚固段和自由段测点的振动应变波幅值和频带迅速衰减, 振动能量集中在窄的频带内, 且持续时间有所增长。结合试验结果、现有的理论和实践, 分析锚固结构在爆破作用下的振动损伤或失效, 基于锚固结构的不同形式的损伤, 从控制振动的幅值、主频段、持续时间和提高结构的抗动态性能方面, 提出预防锚固结构损伤的建议。

**关键词:** 爆炸力学; 锚固结构; 振动; 应变波; 主频段; 损伤

**中图分类号:** O 38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2013)06 - 1257 - 07

## VIBRATION RULE AND DAMAGE OF ANCHORAGE STRUCTURE SUBJECTED TO BLASTING USING MODEL TEST

ZHOU Jijun<sup>1</sup>, WANG Xiaogang<sup>1</sup>, JIA Zhixin<sup>1</sup>, KONG Xiangsong<sup>2</sup>, XIA Yu<sup>2</sup>, GENG Huihui<sup>2</sup>, LIU Lipeng<sup>1</sup>

(1. *Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;*

2. *School of Mechanical and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** In this paper, cement mortar and glass fiber reinforced plastics are used in physical model test to simulate the rock and anchor bolt, respectively. Physical model tests are performed according to similarity law of materials. Vibration rule and damage of different sections of anchorage structure are studied under cut-hole blasting in combination of test, theory and practice. The vibration strain signals are implemented by wavelet packets analysis. The results show that: (1) Under the blasting loading, vibration rules of the anchored and free sections(a row of anchor bolts in the vicinity of working face) are different in frequency, amplitude, duration and waveform. Vibration energy of the row of anchor bolts is basically large, but the energy is distributed randomly with a wide frequency band. (2) With increase of the distance from the working face, amplitude and frequency of vibration strain wave decrease rapidly on anchored and free sections. Vibration energy concentrates in narrow frequency band, but with longer duration. Based on different failure patterns, suggestions are proposed to prevent structure from damage by controlling amplitude, main frequency band and duration of vibration. In addition, anti-dynamic performances of structure should be improved.

**Key words:** blasting mechanics; anchorage structure; vibration; strain wave; main frequency band; damage

## 1 引言

锚索(锚杆)锚固技术能够调动和提高岩体的自

身强度和自稳能力, 充分发挥岩体自身的承载能力, 已广泛地应用于水利水电、交通、矿山等岩体工程领域。锚固结构的长期有效性受诸多因素影响, 工程爆破即是其中很重要的因素之一。现今岩体工程

**收稿日期:** 2013 - 01 - 11; **修回日期:** 2013 - 02 - 05

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013502); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题资助项目(2013ZY05)

**作者简介:** 周纪军(1980 - ), 男, 2003年毕业于山东理工大学采矿工程专业, 现为博士后, 主要从事锚固工程与动载方面的研究工作。E-mail: zhoujijun99@126.com

的开挖掘进主要采用爆破的方式，爆破振动不可避免地已有的和正在形成的锚固结构造成影响，从而影响锚固结构作用的发挥和结构的稳定。研究爆破施工对锚固结构的影响，对于锚固结构的设计和施工都具有重要意义。

在爆破引起的锚杆振动方面，F. O. Otuonye<sup>[1]</sup>现场研究巷道掘进爆破对距离工作面 3.0~4.6 m 处树脂锚杆动态响应的影响；Y. X. Zhou 等<sup>[2-3]</sup>研究了临巷爆破作用下锚杆的动态响应；易长平和卢文波<sup>[4]</sup>利用波函数展开法，分析了不同入射频率对砂浆锚杆动力响应的影响；王浩等<sup>[5]</sup>分析了锚固系统在爆破等动载作用下的动力响应，并提出合理的设计方式。在爆破引起锚固结构损坏方面，陆遐龄<sup>[6]</sup>现场试验发现，由于各组件质量、刚度、受力状态等不同，爆破易产生锚固系统螺母或垫片的振动松弛，甚至损坏，导致预应力的损失；当距锚索 3 m 内进行爆破时，锚索预应力损失明显，为静载作用损失量的 37 倍，且还会造成锚固段锚固力的减小<sup>[7]</sup>；侯忠杰<sup>[8]</sup>测试发现，巷道水沟掘进爆破能造成邻近锚固结构的卸载回零；S. Gisle 和 M. Arne<sup>[9]</sup>通过现场试验分析认为，距工作面 3.4 m 以外，锚杆的拉拔力不受爆破振动的影响。

国内外关于爆炸对防护工程的影响研究较多<sup>[10]</sup>，顾金才等<sup>[11-12]</sup>在此方面的研究比较全面，但是工程爆破相对于爆炸而言，在炸药威力、动载方向和动载作用时间特征等方面存在明显不同。关于爆破对锚固结构影响的研究较少，特别是对于距离工作面较近的锚固系统，基于测试可操作性和系统性的考虑，模型试验是一种相对简单、有效的方法。在近区支护锚杆的动态响应研究基础上<sup>[13]</sup>，本文通过模型试验，研究爆破引起的近区支护锚杆的振动规律，随着距离的增加，分析锚杆振动的应变幅值、频率分布、持续时间和波形的变化，并结合试验结果和现有的理论与实践，分析和探讨爆破对锚固结构造成的损伤以及预防措施。

## 2 物理模型试验

### 2.1 试验模型与材料

为了研究邻近工作面锚杆的爆破振动特点和规律，自行设计了大比尺岩体模型，模型的尺寸为 2.5 m×1.8 m×2.1 m(长×宽×高)；其中，巷道宽 750 mm，高 660 mm，总进深 750 mm，试验模型参见图 1。模型设计中，在控制基本参数相似比(几何相似比 1/6、密度相似比 1/1.3)的基础上，主要控制岩体强

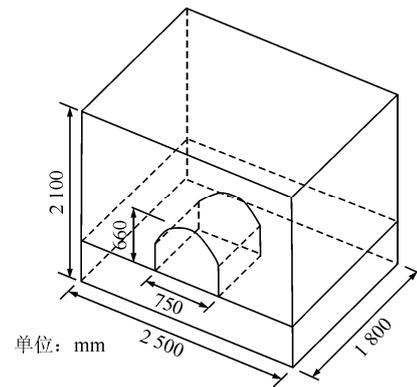


图 1 试验模型

Fig.1 Test model

度和弹性模量的相似比以及岩体与锚杆弹性模量间的匹配。

岩体由 42.5 硅酸盐水泥、中砂和水配置而成的水泥砂浆体模拟，其单轴抗压强度为 2.8 MPa，弹性模量为 3.5 GPa。依据弹性模量匹配原则，最终选择弹性模量为 18 GPa 的玻璃钢模拟锚杆，其长度为 250 mm，直径的比尺要求放宽，选定 10 mm。添加柠檬酸的建筑石膏浆体作为锚固剂和喷层，喷层厚度为 10 mm，其抗压强度约 2.4 MPa。巷道掏槽眼比较集中且向中心倾斜，试验时采用集中装药方式进行模拟，依据工程实际进尺的掏槽药量，通过单耗计算试验掏槽药量约 30 g，炮孔深 250 mm，从孔底开始装药，药包中心深约 200 mm，炮孔其余部分用炮泥填塞。

### 2.2 试验测试

在爆破作用下，锚杆振动应变波由对称黏贴的应变片对获得。锚杆属于端锚锚杆，总长 250 mm，锚固长度 120 mm。应变片 A、B 对分别距锚头端部 100 和 190 mm，具体尺寸见图 2。两对片的中心所在断面分别称为 A、B 断面，分别处于锚固段和自由段。测试锚杆放置时，应变片 A1 和 B1 面向掘进面，应变片 A2 和 B2 背向掘进面。

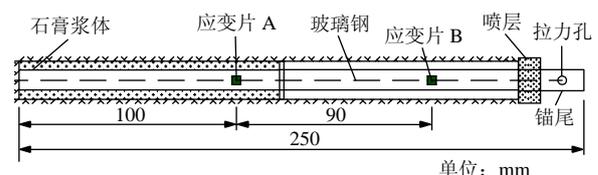


图 2 测试锚杆布置

Fig.2 Arrangement of measured anchor bolts

试验时，先第一次掏槽爆破开挖，利用电镐进行断面修整，形成开挖断面，进尺 250 mm；然后，在断面上布设钻孔点，利用电锤钻孔，并利用大号

注射器、导管和棉毡制成的止浆片辅助，支护第一排锚杆 R1 系列(锚杆编号 R11~R17)，并及时施加稍许预应力和设置喷层。约 3 h 后，第二次掏槽爆破，同时采集第一排测试锚杆动态信号；间隔一段时间后，按照第一次爆破后的程序进行修整巷道，并支护第二排锚杆 R2 系列(锚杆编号 R21~R27)。约 3 h 后，第三次爆破掘进 250 mm，同时采集 2 排测试锚杆的动态信号。2 排锚杆的支护设计见图 3。试验采样率设为 100 kHz，并采取滤波和接地等防止电磁干扰措施。

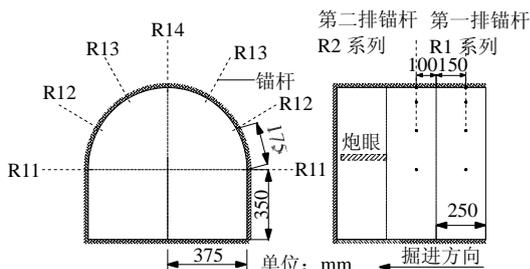


图 3 模型试验中锚杆支护形式  
Fig.3 Anchor bolt supporting patterns in model test

### 3 结果与讨论

为了便于清晰简洁地显示图形，测试锚杆采集到的应变波以 10 kHz 的采样率显示，其中，拉应变为正，压应变为负。为了研究锚杆的径向变形和轴向变形，将对称黏贴应变片测得的波形进行组合，或者采用不同桥路的方式，可得到弯曲应变和轴向应变。弯曲应变和轴向应变的计算公式分别如下：

$$\varepsilon_b = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_1$  为应变片 A1(或 B1)的应变值， $\varepsilon_2$  为 A1(或 B1)对称应变片 A2(或 B2)的应变值。应变片 A1，A2，B1 和 B2 的位置见图 4。

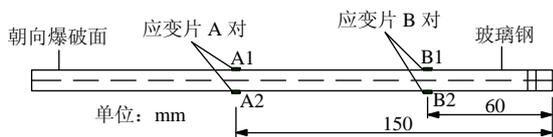


图 4 玻璃钢上应变片的布置  
Fig.4 Arrangement of strain gauges on glass fiber reinforced plastics

#### 3.1 锚固段的爆破振动与损伤分析

测试断面 A 位于锚固段，测试锚杆 R24 和 R13 在此断面采集到的应变波如图 5 所示。图 5(b)所示

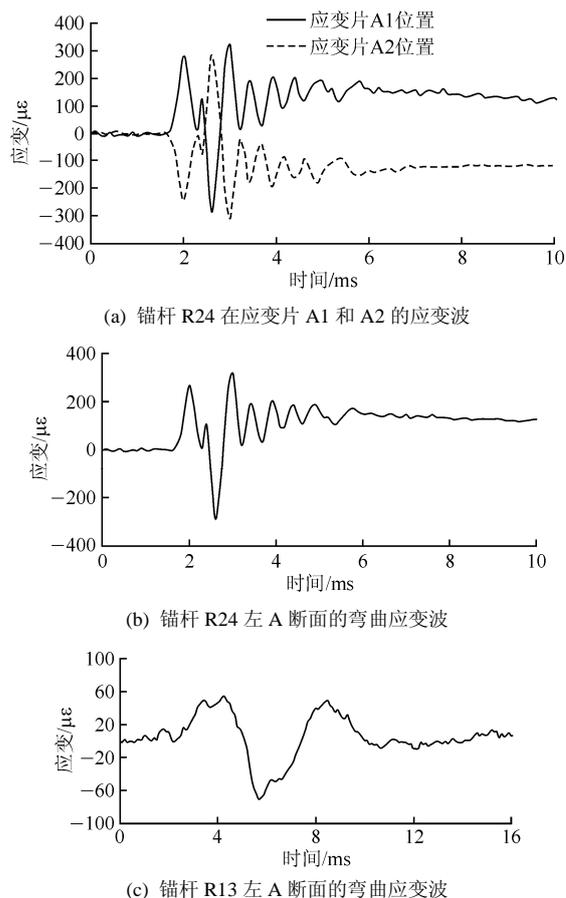


图 5 锚杆 R24 和 R13 在 A 断面测得的应变波形  
Fig.5 Strain waveforms measured at section A of anchor bolts R24 and R13

波形为锚杆 R24 在 A 断面的弯曲应变波，是由同时触发的应变片 A1 和 A2 波形叠加得到，A 断面波形与 A1 应变片测得的几乎相同。这说明爆炸应力波对锚杆的作用主要是径向的，轴向作用很小，这与支护锚杆和爆源相对位置有关。

掏槽爆破时，锚杆 R24 在 A 断面 2 个测点的振动时间约为 5 ms，最大应变幅值为  $290 \times 10^{-6}$ ，振动结束后存在一定残余变形。图 5(c)所示的波形为锚杆 R13 在 A 断面的弯曲应变波，由 A1 和 A2 应变片并联得到，爆破引起 A 断面的振动时间约为 8 ms，最大应变幅值为  $-67 \times 10^{-6}$ 。采用直观分析法<sup>[14]</sup>计算可得到锚杆的振动应变波主频率，锚杆 R24 在 A 断面的主频率约为 1 250 Hz，锚杆 R13 在 A 断面的主频率约为 250 Hz。

第一、二排锚杆分别距离工作面的距离为 400 和 150 mm，随着离工作面距离的增加，位于锚固段的锚杆振动主频率和应变幅值迅速下降，振动时间增长，离工作面最近一排锚杆在振后存在残余变形，也就是说此断面附近杆体在爆破振动后处于弯曲状态，较远一排锚杆则几乎没有。

锚固一般都与喷射混凝土、金属网等支护方式联合使用，形成不同形式的锚固结构。锚杆的振动规律从侧面也反映出锚固结构的振动特点。锚固结构的锚固段由于深入岩体中一定深度，在爆破作用下结构破坏可能相对较小，但是邻近界面的锚固段，可能在振动中破坏。

采用一维应力波理论，瞬态纵波在岩体中传播，应力和应变的关系可表示为

$$\sigma = C_p \rho v \tag{3}$$

式中： $\sigma$ 为应力波作用下岩石中的应力， $\rho$ 为岩石的密度， $C_p$ 为岩石纵波速度， $v$ 为质点振动速度。

岩石的本构方程为

$$\sigma = E \varepsilon \tag{4}$$

式中： $\varepsilon$ 为岩石的应变， $E$ 为岩石弹性模量。根据式(3)和(4)可得

$$v = C_p \varepsilon \tag{5}$$

式(5)表示的是应变与振动速度的关系，也可以表示质点峰值振动速度 *PPV* 与动应变的关系<sup>[15]</sup>。邻近锚固段 - 自由段界面的 A 断面的测点在邻近工作面一排锚杆测得的动应变最大可达  $290 \times 10^{-6}$ ，根据式(5)计算可得峰值速度达 0.98 m/s，结合 T. R. Yu 和 S. Vongpaisal<sup>[16]</sup>提出的爆破损伤系数 *BID* 和 N. Mojtabai 和 S. G. Beatti<sup>[17]</sup>提出的岩石损伤 *PPV* 判据，试验振动中峰值区域的 *PPV* 已超过岩石损伤门槛值，也已超过 C. H. Dowding<sup>[18]</sup>建议的衬砌隧道裂纹产生的应变门槛值  $200 \times 10^{-6}$ ，在锚固段 - 自由段临界界面附近的锚固体是非常容易在振动中遭到破坏的。

爆破测试后，利用切割机和电镐将锚固结构周围岩体剖开，发现在几个锚固体的锚固段 - 自由段界面处产生了裂纹，如图 6 所示。虽然在剖切的过程中可能造成锚固体的二次损伤，但是其他部分则没有出现肉眼观测到的裂纹，一定程度上说明了爆破对邻近锚固段 - 自由段的锚固体造成了损伤。在锚固体的临界界面、软弱或应力的集中区域，爆破容易造成裂纹的产生和发展，特别是在拉力型结构的



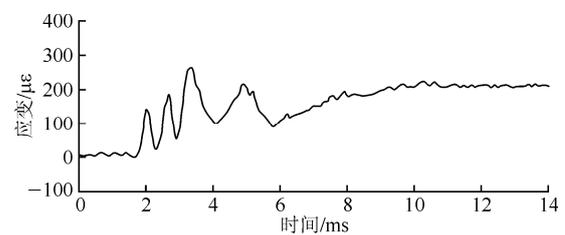
图 6 爆破在锚固结构中引起的裂纹

Fig.6 Cracks on anchorage structure subjected to blasting

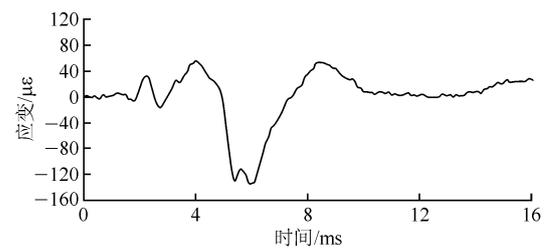
锚固段 - 自由段临界处。

### 3.2 自由段和锚尾的爆破振动与损伤分析

锚杆在 B 断面位于自由段，掏槽爆破时锚杆 R24 和 R13 在 B 断面测得的应变波形如图 7 所示。锚杆 R24 在 B2 应变片位置的应变波持续时间约为 5 ms，最大应变幅值为  $262 \times 10^{-6}$ ，频率较复杂，锚杆振动时测试部位的应变一直处于拉伸状态，在振后锚杆明显存在残余变形。图 7(b)所示为锚杆 R13 在 B 断面的弯曲应变波，其振动持续时间约为 8 ms，最大应变幅值为  $130 \times 10^{-6}$ ，主频约为 234 Hz。随着距离的增加，自由段锚杆振动应变幅值和主频明显下降，时间有所增长，但幅值和主频下降幅度和锚固段有差别。



(a) 锚杆 R24 在应变片 B2 位置的应变波



(b) 锚杆 R13 在 B 断面的弯曲应变波

图 7 锚杆 R24 和 R13 在 B 断面测得的应变波形

Fig.7 Strain waveforms measured at section B of anchor bolts R24 and R13

对于邻近工作面的 R2 系列锚杆，与 A 断面相比，B 断面的振动波形和频率组成较复杂，B 断面的振动明显是由频率相差大但都占主导的几个频段组成。波形的复杂程度与 B 断面边界条件有关。结合图 5(a)，(b)和 7(a)中曲线尾部的残余变形的大小和状态，说明锚杆在爆破振动后处于弯曲状态，且锚固段和自由段存在凹凸有别的弯曲。

由图 8 可知，通过应变片 B1 和 B2 波形的叠加，得到锚杆 R23 在 B 断面的轴向应变和弯曲应变波形。B 断面的振动以弯曲变形为主，轴向变形相对很小，弯曲应变波持续时间约为 7 ms，最大应变幅值约为  $510 \times 10^{-6}$ ，振动形式较简单，直观分析法得到的主频率为 500 Hz。振动时，锚杆的迎爆侧和背爆侧的变形分别一直处于拉伸和压缩状态，支护锚杆受迫振动的应变波表现出一定的冲击特征。

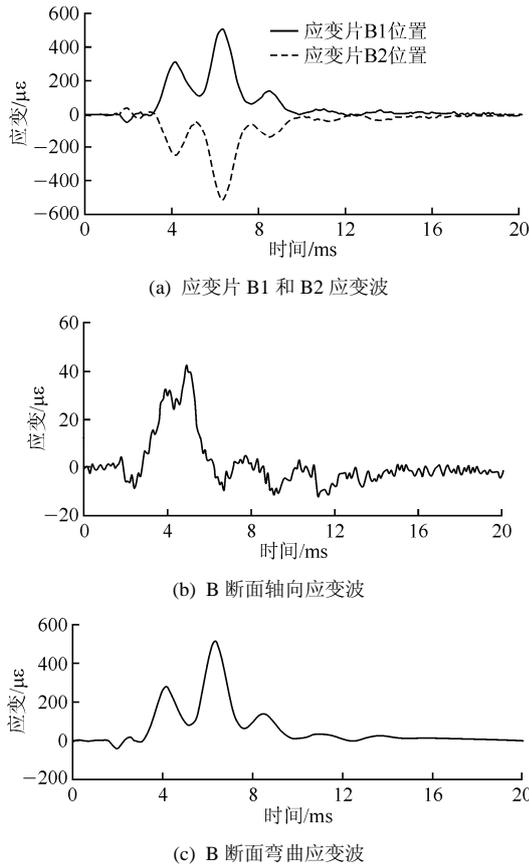


图 8 锚杆 R23 在 B 断面测得的应变波

Fig.8 Strain waveforms measured at section B of anchor bolt R23

图 8 中，锚杆 R23 尾部处于自由状态，B1 位置测点的振动完全由锚固段传递的应力波引起，对比图 7(a)，说明邻近工作面锚杆尾部的振动应是锚固段和喷层传递的 2 种不同波形叠加而成。锚杆尾部的自由状态使得自由段锚杆的振动持续时间和振幅明显增加，而主频率则出现下降的现象，在离爆源同距离条件下，锚杆的边界条件影响锚杆振动响应的主频带。

锚杆自身的强度或屈服强度较大，锚固结构自由段在爆破中的损坏很少发生在锚杆上，一般发生在锚尾部分。锚尾部分是由垫板、螺母、喷层等组件构成，是设置预应力的重要部位，由于各组件的刚度和受力状态的不同，可引起由响应差异而造成结构的损坏或预应力的损失。锚固结构尾部位于巷道表层还会受到面波的影响，在临空面可能会发生波的反射，引起拉应力，成长期的喷射混凝土容易遭受振动而产生层裂等破坏。

模型试验时，在喷层表面出现部分裂纹，巷道帮部由于受到飞石等影响出现裂纹的概率大些，如图 9 所示；喷层最容易破坏的位置为岩体与喷层的

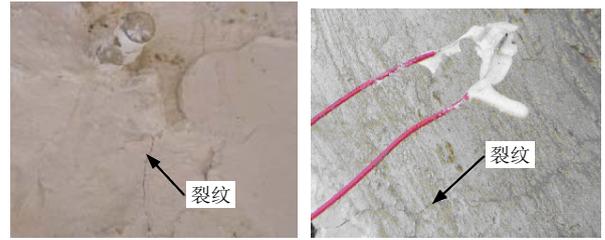


图 9 爆破在喷层中引起的裂纹

Fig.9 Cracks on shotcrete subjected to blasting

黏结界面，当药量增至 1.5 倍时，邻近工作面喷层有部分脱落的现象。巷道掘进中，刚喷射混凝土在 6~8 h 内就会受到一次强烈的爆破振动，实际掘进中，间隔时间可能只有 3 h。在一些巷道现场测试，在下次爆破前的喷射混凝土不足以使回弹仪产生数值，用手可刮下薄层，邻近的爆破会引起喷层的部分掉落。

近区锚杆在振后存在残余弯曲变形，容易产生附加应力，处于成长期的喷层强度如果没有上升到一定值，可能导致锚尾结构直接或在后续爆破振动中破裂或预应力卸载。

### 3.3 应变波的小波包分析

爆破产生的振动波是非周期性的瞬态波形，含有丰富的谐波频率，尤其是在邻近工作面的支护近区。本文采用小波包分析，对信号进行局部化分析，选用 db8 小波基，将频带进行多层次分解、滤波，提取主要频段的信号，对比和分析这些细化频段应变波信号的幅值和时间变化特点。

信号的采样率为 100 kHz，根据 Shannon 采样定律，其 Nyquist 频率为 50 kHz，对于锚杆的振动应变信号  $f(t)$  进行 9 层小波包分解，每个频带宽度为 97.6 Hz，原信号可分解为  $k = 29$  个频段信号的叠加，可表示为

$$f(t) = f_{(9, 0)} + f_{(9, 1)} + \dots + f_{(9, k-1)} \quad (6)$$

式中： $f_{(9, j)}$  表示 9 层分解节点(9,  $j$ )上的某个频段动态信号，其中， $j = 0, 1, 2, \dots, k-1$ 。根据二次能量型表示的时频谱定义<sup>[19]</sup>，可计算离散信号中某段频率的能量百分比。将锚杆 R24 在 A 断面振动波形用 Matlab 软件进行小波包分解，然后根据主要频带进行重构，得到主要频带的信号如图 10 所示。

考虑到仪器的最小工作频率限制和第二排锚杆存在一定残余变形，忽略 50 Hz 以下频段信号。锚杆 R24 在 A 断面的振动信号可以分解为几个主要频段信号。390~590 Hz 频段信号，能量百分比为

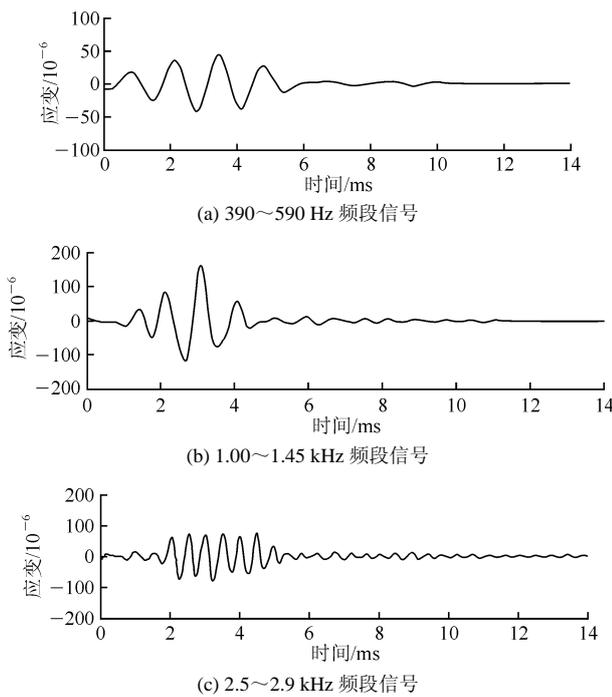


图 10 锚杆 R24 在 A 断面的主要频段应变波形

Fig.10 Strain waveforms of main frequency zones at section A of anchor bolt R24

8.38%，最大应变为  $43.30 \times 10^{-6}$ ，持续时间 6 ms；1.00~1.45 kHz 频段信号，能量占 44.65%，最大应变为  $160.07 \times 10^{-6}$ ；2.5~2.9 kHz 频段信号，能量占 23.59%，最大应变为  $81.87 \times 10^{-6}$ 。第二排锚杆离爆源近，振动能量在频带内分布较分散，较主要的频带为 1.00~1.45, 390~590 Hz 频段能量相对较小，但持续时间比总信号稍长。

锚杆 R13 在 A 断面波形的分解重构信号如图 11 所示。150~350 Hz 频段的重构信号能量占 92%，其信号基本上体现了测点的原信号，此信号的最大应变为  $-71.80 \times 10^{-6}$ ，持续时间约为 9 ms。

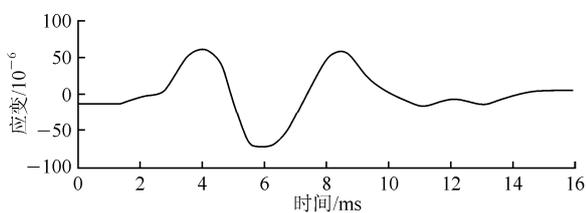


图 11 锚杆 R13 在 A 断面测点的主要频段应变波形

Fig.11 Strain waveforms of main frequency zones at section A of anchor bolt R13

对比图 10 和 11 可以看出，邻近爆源的一排锚杆在锚固段的振动能量的频率分布较分散，高频成分占的比例较大，也存在 390~590 Hz 的低频成分，但能量非常有限，且幅值低。随着离爆源距离的增加，信号的高频成分迅速衰减，在稍远一排锚杆的

主频带衰减为 150~350 Hz，能量集中在此频带内，振动持续时间和幅值增加。

图 10(a)和 11 中应变波三要素的对比说明，振动波传播过程中，介质和结构不仅具有选择性吸收特性，结构对某些频段振动的响应还表现出放大的作用，这种放大包括幅值和持续时间。对于离爆源中远区的锚固结构，由于岩石介质的黏滞吸收，能量集中在有限低频带内，而振动时间和幅值有所增长，加上微差爆破产生振动的叠加，如果能量集中的频带接近结构的固有频率，易产生振动作用的放大，造成响应破坏。

在爆破振动作用下，锚固结构因条件不同会产生不同形式的损伤，爆破破坏是爆破振动的整个过程造成的，与爆破振动的幅值、频率、持续时间和结构的动力特性等有关<sup>[15]</sup>。预防锚固结构的破坏，可以建立反映幅值、频段和持续时间综合影响的爆破振动安全判据。在邻近爆源的支护近区，由于爆破振动频带宽且以高频为主、持续时间短，安全判据指标以幅值为主；在中远支护区，爆破振动的能量集中在低频段，需考虑频率和幅值 2 个指标，如果多段的大规模爆破，则 3 个指标都需要考虑<sup>[20]</sup>。调整爆破设计，控制爆破振动的三要素以防止锚固结构的损伤或失效；调整结构组件的刚度等参数<sup>[6]</sup>，减弱各部分响应的差异，采用注浆体和喷射混凝土中添加钢纤维等措施，提高结构的抗动载能力，也是有效的方法。

## 4 结 论

基于模型试验研究，结合理论分析和实践，分析了在爆破作用下锚固结构的振动规律与损伤，主要结论如下：

(1) 在掘进爆破作用下，邻近工作面锚杆的锚固段和自由段振动响应明显不同，但都是以径向振动为主；随着离工作面距离的增加，两段的振动应变波幅值和频带迅速衰减，持续时间则稍有增长；锚杆尾部的边界条件影响锚杆振动响应的主频带。

(2) 通过小波包分解可知，距工作面水平距离 150 mm 锚杆的振动能量大且分散，存在低频成分但能量很小；随着距离的增加，锚杆振动的能量集中在低频带内，能量可观；在波的传播过程中，不仅介质对频率具有选择性吸收作用，结构对某些频段振动的响应还具有放大作用。

(3) 在爆破作用下，锚固段 - 自由段临界面附近的锚固体易产生裂纹，锚尾部的喷层易产生裂纹、

脱落或预应力的卸载, 造成近区锚固结构的损伤或失效; 基于不同损坏形式, 可以有侧重地从控制振动幅值、主频段和持续时间以及提高结构的抗动载性能四方面, 预防锚固结构损伤或失效。

### 参考文献(References):

- [1] OTUONYE F O. Response of grouted roof bolts to blast loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1988, 25(5): 345 - 349.
- [2] ZHOU Y X, JENSSEN A. Internal separation distances for underground explosives storage in hard rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 119 - 125.
- [3] TANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rock behaviour under dynamic loading: field tests and modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 537 - 550.
- [4] 易长平, 卢文波. 爆破振动对砂浆锚杆的影响研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 312 - 1 316.(YI Changping, LU Wenbo. Research on influence of blasting vibration on grouted rockbolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 312 - 1 316.(in Chinese))
- [5] 王浩, 陈峰, 柳墩利, 等. 动荷载作用下边坡锚固系统合理设计探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 690 - 695.(WANG Hao, CHEN Feng, LIU Dunli, et al. Discuss on reasonable design of slope anchor system under dynamic loads[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6): 690 - 695.(in Chinese))
- [6] 陆遐龄. 岩石高边坡爆破开挖对锚固设施的影响[J]. 爆破, 2000, 17(增1): 147 - 151.(LU Xialing. Influence of rock high slope explosive excavation on anchored installations[J]. Blasting, 2000, 17(Supp.1): 147 - 151.(in Chinese))
- [7] 郭作纯, 邓志深. 锚索预应力损失的影响因素及对策[J]. 水运工程, 2006, (7): 16 - 17.(GUO Zuochun, DENG Zhishen. Factor influencing loss of anchor chain's prestress and countermeasures[J]. Port and Waterway Engineering, 2006, (7): 16 - 17.(in Chinese))
- [8] 侯忠杰. 爆破对树脂锚杆载荷的影响[J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 14(1): 36 - 39.(HOU Zhongjie. Influence of blasting on resin rockbolt loading[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1997, 14(1): 36 - 39.(in Chinese))
- [9] GISLE S, ARNE M. The influence of blasting on grouted rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 65 - 70.
- [10] 李世民, 韩省亮, 曾宪明, 等. 锚固类结构抗爆性能研究与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3 553 - 3 562.(LI Shimin, HAN Shengliang, ZENG Xianming, et al. Research progress of explosion-resistance behavior of anchorage type of structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 553 - 3 562.(in Chinese))
- [11] 顾金才, 陈安敏, 徐景茂, 等. 在爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 315 - 1 320.(GU Jincai, CHEN Anmin, XU Jingmao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel subjected to explosion load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 315 - 1 320.(in Chinese))
- [12] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 顶爆作用下锚杆破坏形式及破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 27 - 31.(WANG Guangyong, GU Jincai, CHEN Anmin, et al. Model test research on failure forms and failure mechanism of anchor bolts under top explosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 27 - 31.(in Chinese))
- [13] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1 540 - 1 546.(SHAN Renliang, ZHOU Jijun, XIA Yu, et al. Experimental investigation on dynamic response of rockbolt under blasting load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1 540 - 1 546.(in Chinese))
- [14] 郭学斌, 肖正学, 张继春. 爆破振动频率特性的测试与研究[J]. 中国矿业, 2004, 13(9): 68 - 71.(GUO Xuebin, XIAO Zhengxue, ZHANG Jichun. Testing and study of frequency specific property of blasting vibration[J]. China Mining Magazine, 2004, 13(9): 68 - 71.(in Chinese))
- [15] 卢文波, 李海波, 陈明, 等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 513 - 1 520.(LU Wenbo, LI Haibo, CHEN Ming, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 513 - 1 520.(in Chinese))
- [16] YU T R, VONGPAISAL S. New blast damage criteria for underground blasting[J]. CIM Bulletin, 1996, 89(3): 139 - 145.
- [17] MOJITABAI N, BEATTI S G. Empirical approach to prediction of damage in bench blasting[J]. Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy Section A, 1996, 105(A): 75 - 80.
- [18] DOWDING C H. Estimating earthquake damage from explosion testing of full-scale tunnels[J]. Advanced in Tunnelling Technology and Subsurface Use, 1984, 4(3): 113 - 117.
- [19] 林大超, 白春华. 爆炸地震效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 63 - 67.(LIN Dachao, BAI Chunhua. Seismic effect of explosions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 63 - 67.(in Chinese))
- [20] 阳生权, 廖先葵, 刘宝琛. 爆破地震安全判据的缺陷与改进[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 223 - 228.(YANG Shengquan, LIAO Xiankui, LIU Baochen. Default of the judging standard of blasting vibration safety abstract[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 223 - 228.(in Chinese))