

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.022

## 基于压电监测技术的结构裂缝 对爆破振动响应影响的试验研究\*

万奔<sup>1</sup>,薛育阳<sup>1</sup>,龚鑫<sup>1</sup>,曾卓<sup>1</sup>,谢卓雄<sup>2</sup>,汪波<sup>3</sup>,彭畅宇<sup>3</sup>

(1. 广东省路桥建设发展有限公司,广州 510990;  
2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司,广州 510507;3. 西南交通大学,成都 610031)

**摘要:** 基于旦架哨隧道改扩建工程既有隧道衬砌裂缝分布特征,采用室内试验手段,以水泥砂浆模拟隧道衬砌结构,借助高压脉冲破裂技术装置模拟爆破震源,开展基于压电监测技术的结构裂缝角度对爆破振动响应的影响研究。结果表明:随爆破次数的增加,结构裂缝角度越大,压电被动信号峰值响应出现时间越早,且后期衰减越快。裂缝角度对信号峰值的影响呈现显著方向性——与无裂缝条件相比,当裂缝角度分别为30°、60°和90°时,对迎爆侧信号峰值显示明显的放大效应,信号分别增加了22.3%、40.2%和90.1%。然而,当裂缝角度为0°时,信号峰值却呈现降低趋势,最大降幅为5.8%。同时运用压电主动监测技术,监测爆破前后裂缝周围结构的损伤变化发现:无裂缝结构中压电主动信号共振峰数量及幅值均显著高于裂缝结构,且裂缝结构中信号存在向高频转移的现象;随爆破次数的增加,信号的衰减速度也随裂缝角度的减小而逐渐增大,表明裂缝方向与爆破波传播方向的角度越小,裂缝周围结构损伤发展越快且程度越严重。

**关键词:** 结构裂缝;压电;振动响应;放大效应;损伤

**中图分类号:** U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0205-10

## Experimental Study on Effect of Structural Cracks on Blasting Vibration Response based on Piezoelectric Monitoring Technology

WAN Ben<sup>1</sup>, XUE Yu-yang<sup>1</sup>, GONG Xin<sup>1</sup>, ZENG Zhuo<sup>1</sup>, XIE Zhuo-xiong<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, PENG Chang-yu<sup>3</sup>

(1. Guangdong Road and Bridge Construction Development Co., Ltd., Guangzhou 510990, China;  
2. Guangdong Communication Planning&Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507,  
China;3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of blasting vibrations on tunnel lining structures through laboratory experiments based on crack distribution characteristics observed in the Danjiashao Tunnel reconstruction and expansion project. Using cement mortar to simulate tunnel lining structures and a high-pressure pulse fracturing device to replicate blasting vibration sources, the research methodology was designed to analyze vibration-induced damage

收稿日期 (Date of reception): 2025-04-30

网络首发日期 (Published online): 2025-12-15

作者简介: 万奔 (1988-), 男, 江西南昌, 本科, 工程师, 主要从事桥梁与隧道工程方向研究, (E-mail) 362374056@qq.com.

通信作者: 薛育阳 (1998-), 男, 海南海口, 硕士, 主要从事桥梁与隧道工程方向研究, (E-mail) 798904007@qq.com.

基金项目: 广东交通集团科技项目: 京港澳高速公路粤境清远佛冈至广州太和段改扩建项目 (JT2022YB26) 近距离增建隧道开挖对既有隧道结构的安全影响与关键控制技术研究

**About the author:** WAN Ben (1988-), male, born in Nanchang city, Jiangxi province, bachelor's degree, engineer, main research focuses on bridge and tunnel engineering, (E-mail) 362374056@qq.com.

**Corresponding author:** XUE Yu-yang (1998-), male, born in Haikou city, Hainan province, master's degree, main research direction is bridge and tunnel engineering, (E-mail) 798904007@qq.com.

**Fund Programs:** Science and Technology Project of Guangdong Communications Group (Project No. JT2022YB26) Research on the Safety Impact and Key Control Technology of Existing Tunnel Structures Caused by Close Proximity Tunnel Excavation in the Reconstruction and Expansion Project of the Qingyuan Fogang to Guangzhou Taihe Section of the Beijing-Hong Kong-Macao Expressway in Guangdong

mechanisms systematically. A study was conducted on the impact of structural crack angles on the blasting vibration response using piezoelectric monitoring technology. The results demonstrate that as blast repetition increases, structures with larger crack angles exhibit earlier peak response times in piezoelectric passive signals and more rapid subsequent signal attenuation, revealing a distinct correlation between crack geometry and dynamic response characteristics under repeated blast loading. The directional influence of crack angle on signal peak amplification exhibits significant anisotropy. Comparative analysis with crack-free conditions reveals that crack angles of  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$  produce pronounced signal amplification effects on the blast-facing side, demonstrating progressive increases of 22.3%, 40.2%, and 90.1% in peak signal intensity, respectively. However, the signal peak exhibits a decreasing trend, with a maximum decline of 5.8% at a crack angle of  $0^\circ$ . Meanwhile, the study employed piezoelectric active monitoring technology to evaluate structural damage around cracks before and after blasting, revealing that crack-free structures exhibited significantly greater numbers and amplitudes of resonance peaks in piezoelectric signals compared to cracked structures, with the latter demonstrating a distinct high-frequency shift phenomenon. As the number of blasts increases, the signal attenuation rate progressively rises with decreasing crack angle, indicating that a smaller angle between the crack orientation and the blast wave propagation direction accelerates damage development and intensifies the severity of crack-zone damage.

**Key words:** structural crack; piezoelectric; vibration response; amplification effect; damage

进入 21 世纪以来,中国公路建设进入了一个前所未有的高速发展时期。与此同时,针对修建年代相对较早且已难以满足当下通行需求的高速公路进行改扩建,已成为提升国家高速公路网通行效率、增强民众出行幸福感的关键举措,这一议题也逐渐成为广为关注的话题。在高速公路隧道的改扩建工程中,施工进度往往受到复杂地形条件、既有线路布局以及既有施工工艺的多重制约。且随着生态环保理念的日益深入人心,小净距隧道凭借其在土地资源节约与生态环境保护方面的显著优势,愈发成为众多隧道改扩建项目的优先选择。然而,由于小净距隧道间距较近,新建隧道在爆破施工时对既有隧道产生的振动影响,已成为亟待解决且不可忽视的工程难点之一<sup>[1]</sup>。

目前,针对小净距新建隧道爆破开挖对既有隧道的影响,已有众多学者开展了相关研究。比如,李小帅等分析了小净距隧道掏槽孔与周边孔爆破时对后行洞非中夹岩区与中夹岩区产生的不同振动特征<sup>[2]</sup>,指出掏槽孔爆破能量传播对中夹岩的远区振动影响更为显著。马跃原等通过监测分析了小净距大断面隧道后行洞开挖过程中先行洞纵、横断面的爆破振动速度分布规律<sup>[3]</sup>,并提出了相应的爆破振动安全控制措施。罗阳等结合现场监测数据和数值模拟结果<sup>[4]</sup>,研究了新老隧道在不同净距条件下的影响规律。李秀地等考虑既有隧道初期支护作用<sup>[5]</sup>,通过数值模拟研究了新建隧道爆破对既有运营隧道的影响规律,并提出了药量控制标准。朱正国等对先行隧道不同位置处质点振动速度进行监测分析<sup>[6]</sup>,并针对工程特点优化了既有的爆破参数。

上述研究从不同角度对小净距新建隧道爆破开挖的影响进行了深入探讨,但现有研究大多集中在爆破振动的传播规律、振动速度分布及控制措施等方面,而对既有隧道结构可能出现的病害问题尚未纳入研究范畴。

而由于我国地质条件复杂多样,早期建设的隧道由于受到当时设计、施工技术水平的限制,常会出现结构裂缝、衬砌背后空洞等病害<sup>[7]</sup>。这些病害不仅会影响隧道结构的完整性,还会对结构的动力响应产生显著影响,进而降低既有隧道的安全性。因此,深入研究爆破施工对既有病害结构的影响具有极为重要的现实意义。目前,针对该问题,已有学者开展了结构病害对动力响应影响的相关研究。例如,汪波等通过数值模拟方法<sup>[8]</sup>,研究了新建隧道爆破开挖过程中既有隧道衬砌裂缝对结构动力响应的影响。然而,现有研究在方法上仍存在局限性,主要集中在数值模拟层面,且尚未考虑裂缝角度对动力响应的影响。

因此,鉴于锆钛酸铅(PZT)传感器(压电监测技术)具有驱动和传感能力强、成本低、响应快等显著优势<sup>[9,10]</sup>,其已被广泛应用于混凝土结构的损伤监测中<sup>[11,12]</sup>。本研究基于循环爆破条件,对不同角度裂缝( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ )对结构振动响应的影响规律开展了实验研究。具体而言,采用高压脉冲压裂装置替代炸药模拟爆源,利用压电被动和主动监测技术分别对结构的瞬时响应以及爆破前后裂缝周围的内部损伤进行表征。这一研究为裂缝结构附近爆破作业的安全控制提供了依据,并可以进一步拓展压电监测技术在复杂工程中的应用潜力。

# 1 裂缝分布调研

旦架哨隧道位于京港澳高速公路粤境清远至广州段, 为上下行分离式六车道高速公路隧道, 左右线全长分别约 735 m 和 785 m, 最大埋深约 150 m。根据沿线地形条件及控制因素, 既有隧道段采取了“中间 + 西侧分离扩建”方案, 即利用既有隧道中间空地, 在中间和西侧各新建三车道隧道, 如图 1 所示。其中, 新老隧道净距最小约 25 m 左右。

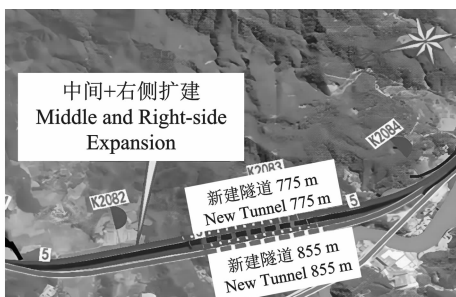


图 1 旦架哨隧道改扩建方案

Fig. 1 Danjiaoshao tunnel reconstruction and expansion plan

对旦架哨既有隧道衬砌裂缝分布进行调研, 如图 2 所示, 裂缝沿隧道环向均分布在边墙部位, 且裂缝宽度多小于 0.2 mm。并通过对类似公路隧道裂缝深度调研分析<sup>[13-16]</sup>, 大部分裂缝深度达到衬砌厚度的 1/4。

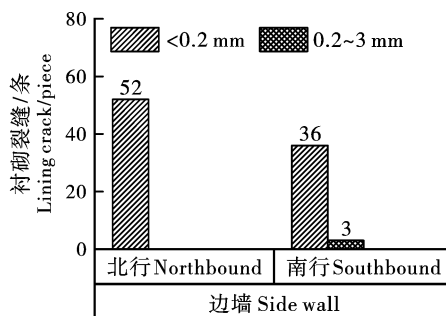


图 2 衬砌裂缝分布位置及宽度统计

Fig. 2 Location and width of lining cracks

另外, 既有隧道洞身衬砌裂缝中, 环向裂缝 (0°) 最多, 其次为斜向裂缝, 纵向裂缝 (90°) 最少。斜向裂缝角度主要集中在 30° ~ 60°, 如图 3 所示。

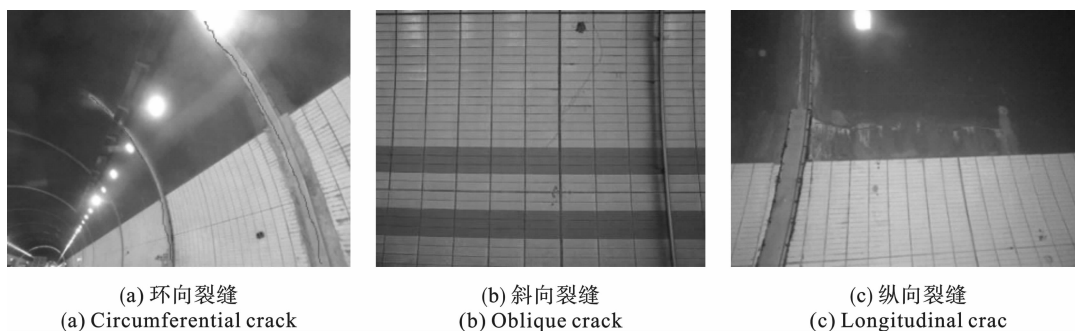


图 3 衬砌裂缝角度分布

Fig. 3 Distribution of the angles of lining cracks

# 2 试验方法

## 2.1 爆源模拟装置

传统室内爆破试验通常采用雷管或黑火药等作为爆源, 然而这些材料不仅存在极高的安全风险, 而且获取难度较大。相比之下, 高压脉冲致裂装置作为一种非爆炸破岩技术, 已在采矿、地质勘探等领域得到了广泛应用。该技术能够有效避免有毒有害气体和飞屑的产生, 兼具安全性和环保性。

高压脉冲致裂装置主要由控制单元、储能电容器和炮头组成, 其基本原理如图 4 所示: 通过在阳极和阴极之间快速施加  $10^3 \sim 10^4$  V 的电场, 使炮孔中的水在极短时间内发生电离和汽化, 从而产生迅速膨胀的高温高压冲击波<sup>[17]</sup>。且根据以往研究研究表明, 这种冲击波能够模拟传统爆破产生的应力波,

与传统爆破波形类似, 如图 5 所示<sup>[18]</sup>。因此作为一种更安全、更易获取的爆源模拟方案, 高压脉冲致裂技术被采用。

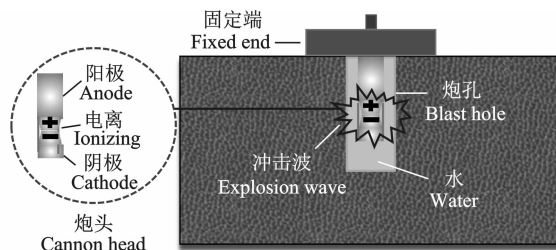


图 4 高压脉冲致裂技术基本原理

Fig. 4 Basic principle of the high-voltage pulse fracturing technology

## 2.2 试件制作

本研究系统性地开展了不同结构裂缝角度 (0°、

30°、60°、90°)对结构振动响应影响的试验研究,具

体工况如表1所示。

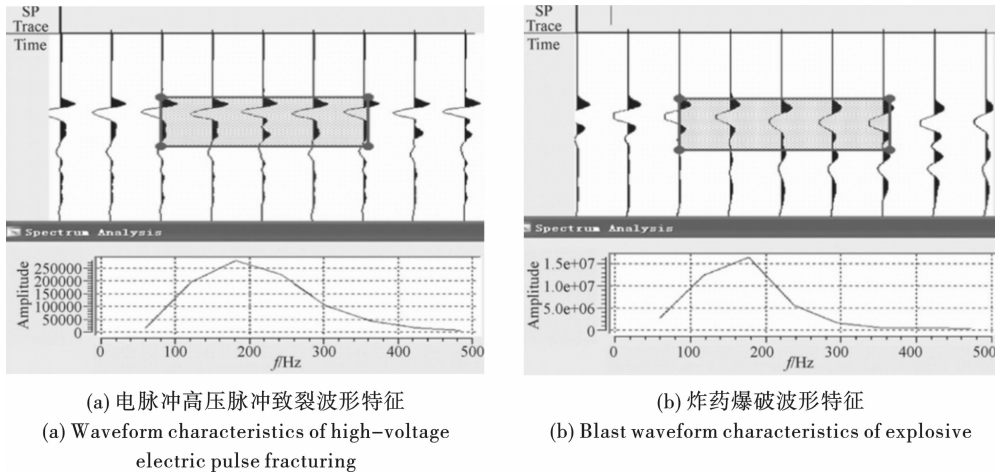


图5 电脉冲高压脉冲致裂与炸药爆破波形特征对比<sup>[18]</sup>  
Fig. 5 Comparison of waveform characteristics between electric pulse high-voltage pulse fracturing and explosive blasting<sup>[18]</sup>

表1 试验工况  
Table 1 Test conditions

工况 Working condition	分组 Grouping	工况编号 Working condition number	裂缝角度 Crack angle
C - A	对照组 Control group	C - A0	无裂缝 No crack
	实验组 Experimental group	C - A1	0°
		C - A2	30°
		C - A3	60°
		C - A4	90°

试验试件的整体尺寸为 100 cm(长)×40 cm(高)×40 cm(宽),试件上设有一个直径 5 cm、深度 20 cm 的炮孔。根据高压脉冲致裂装置的工作原理,炮孔在实验过程中需要充水,以确保电极能够完全浸没其中。因此,炮孔的尺寸应略大于炮头尺寸,以满足实验要求。其次,预制裂缝宽度为 2 mm,深度为 5 cm,长度为 30 cm,且不同角度的裂缝中心距炮孔中心均为 45 cm。试件尺寸以及浇筑过程分别如图 6 所示。

### 2.3 监测方法

压电信号监测系统是一种集压电信号传输、采集与分析于一体的高性能便携式监测系统,广泛应用于结构健康监测领域。该系统由压电智能监测结构、EO1\_A1 信号放大器、DAQ 数据采集系统、LabVIEW 操作软件以及信号分析系统组成。其中,压电智能监测结构是系统的核心部分,它包括压电陶瓷智能聚集体、屏蔽导体和 BNC 连接器。智能聚集体由锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷构成,并被包裹在绝

缘外壳中,以确保其性能稳定和信号传输的可靠性,其结构示意图如图 7 所示。

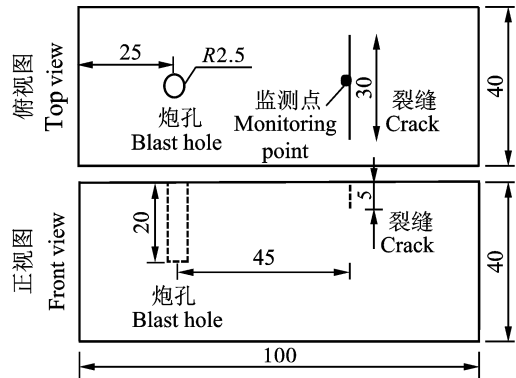


图6 试件尺寸(单位:cm)  
Fig. 6 Sample size(unit:cm)

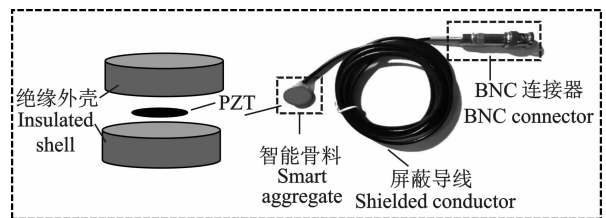


图7 压电智能监测结构  
Fig. 7 Piezoelectric intelligent monitoring structure

试验中分别利用压电监测技术被动法和主动法对不同工况下结构爆破时裂缝迎爆侧的瞬时响应规律以及爆破前后裂缝周围结构的内部损伤情况进行监测。压电监测原理分别如图 8 中(a)和(b)所示。为了使传感器可以重复使用,驱动器和接收器分别用凡士林固定在监测点。压电信号监测系统的主要

技术参数详见表 2。

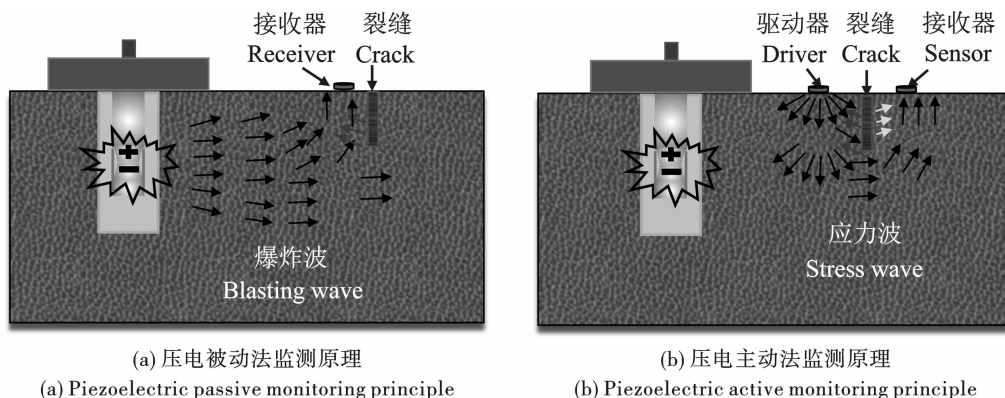


图 8 压电监测原理

Fig. 8 Piezoelectric monitoring principle

表 2 压电信号监测系统的主要技术参数

Table 2 The main technical parameters of piezoelectric signal monitoring system

参数 Parameters	信号发生器 Signal generator				
	频率/Hz Frequency/Hz		幅值/V Amplitude/V	采集时间/s Acquisition time/s	步数 Step count
	起始 Initial	结束 Final			
值 Value	10 <sup>2</sup>	2 × 10 <sup>5</sup>	10	1	10 <sup>4</sup>
参数 Parameters	时间参数				
	输入频率/Hz Input frequency/Hz	输出频率/Hz Output frequency/Hz		读入步数 Read in steps	
	值 Value	106	106	106	

### 3 试验结果分析

#### 3.1 瞬时响应分析

图 9 详细展示了循环爆破过程中不同角度裂缝 (0°、30°、60°、90°) 迎爆侧结构处压电被动监测时域信号衰减曲线 (以第一次, 第三次和第五次爆破为例)。从图中可以清晰地看出, 压电被动技术能够有效捕捉到结构在爆破瞬间的响应特征。具体而言, 除了 0° 裂缝外, 30°、60° 和 90° 裂缝对迎爆侧结构监测点处的压电被动时域信号产生了显著的放大效应, 这种放大效应表明, 裂缝的存在不仅改变了应力波的传播路径, 还影响了能量在结构中的分布。同时, 信号的对称性分布特征也明显减弱, 进一步说明裂缝角度对结构振动响应的影响具有显著的方向性。且裂缝的存在会改变结构内部应力波的传播路径和能量分布。

图 10 展示了循环爆破过程中不同工况下结构监测点处压电被动时域信号峰值的变化规律。从图中可以明显看出, 随着循环爆破次数的增加, 不同裂

缝角度对应的信号峰值变化规律存在显著差异。具体而言: 当裂缝角度为 90° (裂缝与爆破波传播方向垂直) 时, 信号峰值随爆破次数的增加呈现出先增加后减少的变化趋势。而当裂缝角度为 60°、30° 和 0° 时, 信号峰值则随着爆破次数的增加持续衰减。从放大效应的角度来看, 与无裂缝条件相比, 裂缝角度为 30°、60° 和 90° 时, 迎爆侧信号峰值最大分别增加了 22.3%、40.2% 和 90.1%, 显示出明显的信号放大效应; 然而, 当裂缝角度为 0° 时, 信号峰值却呈现出降低的趋势, 最大降幅为 5.8%。

#### 3.2 结构损伤分析

在结构损伤表征中, 针对压电主动信号的分析通常采用两种方法: 其一, 基于信号峰值变化规律分析结构内部损伤状况。信号峰值的变化能够直观反映爆破作用下结构的损伤程度, 一旦出现显著衰减常意味着损伤累积或加剧。其二, 利用小波包变换技术, 将原始信号分解为等带宽的子分量。该方法通过自适应地选取特征频段, 揭示信号在频域内的分布特征与能量变化情况。

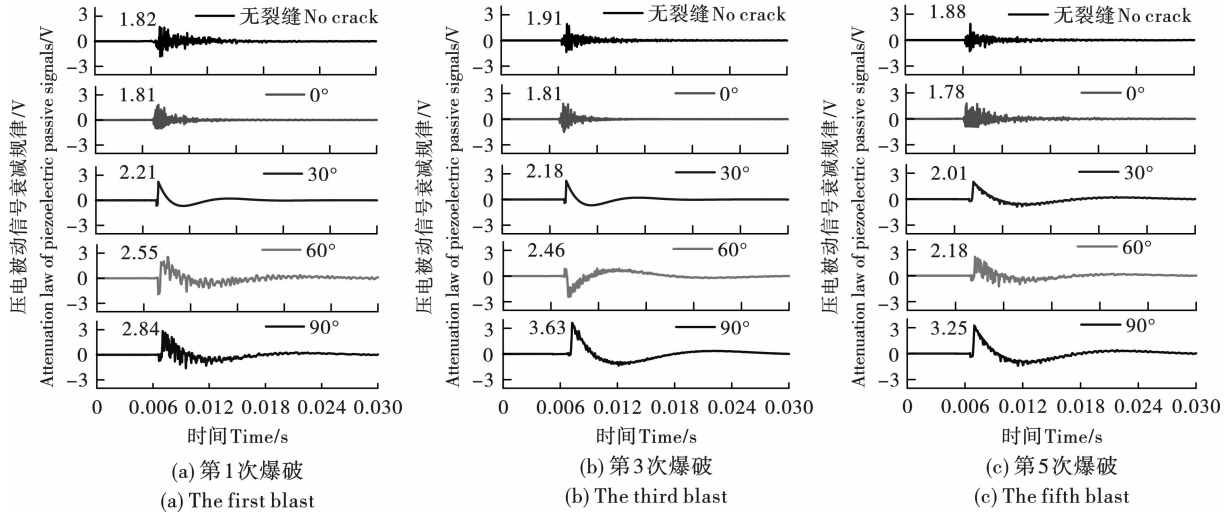
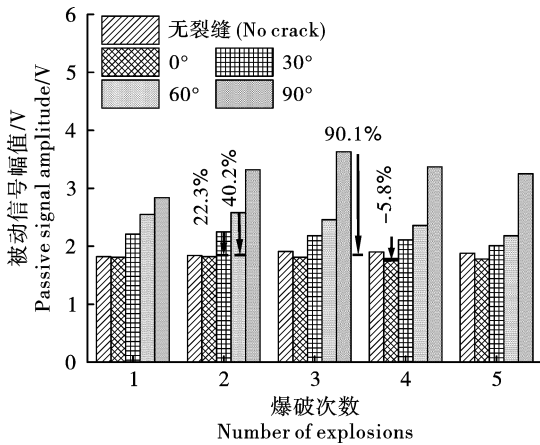


图9 不同工况下压电被动时域信号衰减规律

Fig. 9 Attenuation law of piezoelectric passive time-domain signal under different working conditions

图10 不同工况下结构监测点处被动信号峰值  
Fig. 10 Peak value of passive signal at structural monitoring points under different working conditions

在小波包变换的实际应用中, Daubechies 系列小波作为当前最为成熟、应用最广泛的正交连续小波基函数体系, 以  $dbN$  ( $N$  代表小波阶数) 的形式被广泛使用<sup>[19]</sup>。其中,  $db10$  小波基函数凭借突出的高正则性和平滑特性, 在高精度频域分析和平滑信号处理中表现突出, 尤其在处理中高频复杂信号的分解与降噪时, 能够有效过滤噪声干扰, 提取反映结构真实损伤状态的有效信号。基于上述优势, 本研究选用  $db10$  小波基函数开展小波包分解, 通过对结构压电主动信号进行能量分解与重构, 将信号的特征分量提取出来并映射到不同频带, 与不同频带能量分布的对比分析, 来体现不同结构中压电主动信号的差异性。采用三层小波包分解方法将原始信号分解为 23 (即 8) 个分量, 以便更全面地分析信号的频域特征和能量分布, 其分解过程如图 11 所示。

每一组对应的分解信号  $S_j$  可以表示为

$$S_j = \{S_{j,1}, S_{j,2}, \dots, S_{j,m}\} \quad (1)$$

式中:  $j$  为信号频带;  $m$  为采样量。

分解信号的能量定义为

$$E_j = \|S_j\|_2^2 = S_{j,1}^2 + S_{j,2}^2 + \dots + S_{j,m}^2 \quad (2)$$

( $j = 1, 2, \dots, 2^n$ )

时刻  $i$  的信号能量矢量为

$$E_i = (E_{i,1}, E_{i,2}, \dots, E_{i,2^n}) \quad (3)$$

压电传感器在时刻  $i$  接收到的信号总能量表示为

$$E(i) = \sum (E_{i,1} + E_{i,2} + \dots + E_{i,2^n}) \quad (4)$$

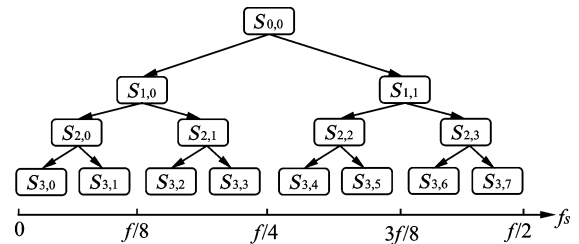


图11 小波包分解原理

Fig. 11 Wavelet packet decomposition principle

### 3.2.1 压电主动时域信号分析

图 12 展示了不同工况下结构裂缝两侧的压电主动时域信号分布规律。由于信号数据量较大, 本研究选取了结构在第一次爆破、第三次爆破以及最后一次爆破时的信号进行分析, 以反映不同工况下的信号特征。从图中可以看出, 裂缝结构和无裂缝结构在压电主动时域信号上表现出显著不同的变化规律。

图 12(a) 为无裂缝结构在循环爆破前后监测点周围的压电主动时域信号分布规律。结果显示, 无裂缝结构的时域信号呈现出多个共振峰, 其中最大

峰值出现在约 0.7 s 的扫频时间,且该峰明显高于其他共振峰,表明结构在该时间点具有较强的信号响应能力。图 12(b)则展示了裂缝结构在循环爆破前后的压电主动时域信号分布规律(以裂缝角度为 30°和 90°为例)。与无裂缝结构相比,裂缝结构的时域信号表现出明显的差异:共振峰数量显著减少,

不同共振峰在扫频时间内的峰值差也明显缩小。此外,裂缝结构的信号峰值明显低于无裂缝结构。这一现象表明,结构裂缝的存在显著削弱了驱动器与传感器之间的信号传播能力,导致信号强度和共振特征发生明显变化。

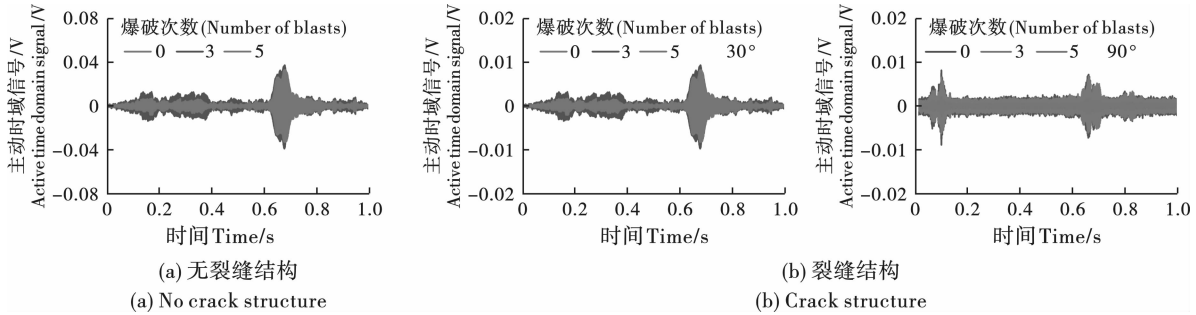


图 12 不同工况下结构主动时域信号分布规律

Fig. 12 Structure active time domain signal distribution under different working conditions

为了更直观地呈现循环爆破前后不同工况下裂缝附近压电主动时域信号峰值的变化情况,提取并绘制了相应的峰值变化曲线,如图 13 所示。由图可看出,循环爆破对裂缝结构信号的影响随着裂缝角度的减小而显著增强。具体而言,裂缝角度越小,信号峰值的衰减速度越快,这表明裂缝附近的结构损伤对爆破次数更为敏感,且造成的损伤更为严重。相比爆破前,第五次爆破后,无裂缝结构的信号峰值下降了 9.1%,而 0°、30°、60°和 90°裂缝结构的信号峰值分别下降了 83.9%、79.5%、76.7%和 75.3%。这一结果进一步说明,裂缝角度对结构损伤的影响具有显著的影响,小角度裂缝结构在循环爆破作用下表现出更明显的信号衰减特征,反映出其内部损伤的加剧。

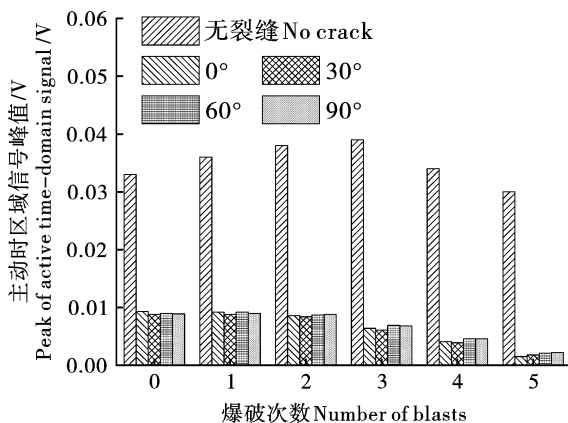


图 13 不同工况下结构主动时域信号峰值变化

Fig. 13 Changes of structural active signal peak value in time domain under different working conditions

### 3.2.2 压电主动频域信号分析

基于上述小波包分解原理,利用 MATLAB 软件对不同工况下的结构压电主动时域信号进行分解,得到相应的频域信号分布,如图 14 所示(以无裂缝,30°和 90°裂缝为例)。为了更全面地反映信号特征,同样选取了结构在第一次爆破、第三次爆破以及最后一次爆破时的信号进行分析。

图 14(a)展示了无裂缝结构的频域信号分布。从图中可以看出,无裂缝结构的频域信号主要集中在  $S_{3,0}$ 、 $S_{3,1}$  和  $S_{3,2}$  频段(0 ~ 187 500 Hz),其中  $S_{3,2}$  频段的信号强度占主导地位,而在  $S_{3,3}$  到  $S_{3,7}$  频段中(187 500 ~ 500 000 Hz),频域信号分布基本为零,表明无裂缝结构在高频段几乎无信号响应。

相比之下,裂缝结构的频域信号分布如图 14(b)所示。与无裂缝结构不同,裂缝结构的信号不仅分布在  $S_{3,0}$  到  $S_{3,2}$  频段,还在更高频段( $S_{3,3}$  到  $S_{3,7}$ )中出现显著分布。这一现象表明,裂缝的存在导致结构的频域信号向更高频带偏移,反映出裂缝对结构内部应力波传播路径和能量分布的显著影响。这种频带偏移可能与裂缝引起的局部应力集中和结构刚度降低有关,进一步说明裂缝对结构动态响应的复杂影响机制。

此外,如图 15 所示,频域信号峰值同样受到裂缝角度和爆破次数的显著影响。无裂缝结构的频域信号峰值明显高于裂缝结构,表明裂缝的存在显著削弱了结构的信号强度。进一步分析发现,裂缝角度越小,信号峰值的衰减速度越快。具体而言,与爆破前相比,第五次爆破后,无裂缝结构的频域信号峰

值下降了 9.0%，而 0°、30°、60° 和 90° 裂缝结构的频域信号峰值分别下降了 83.2%、79.3%、76.8% 和 75.3%。这一结果与原始时域信号的变化规律基本

一致，进一步验证了该分解方法的准确性和合理性。其次说明频域信号也能够有效反映结构损伤情况，可为结构健康监测提供更加有力的支持。

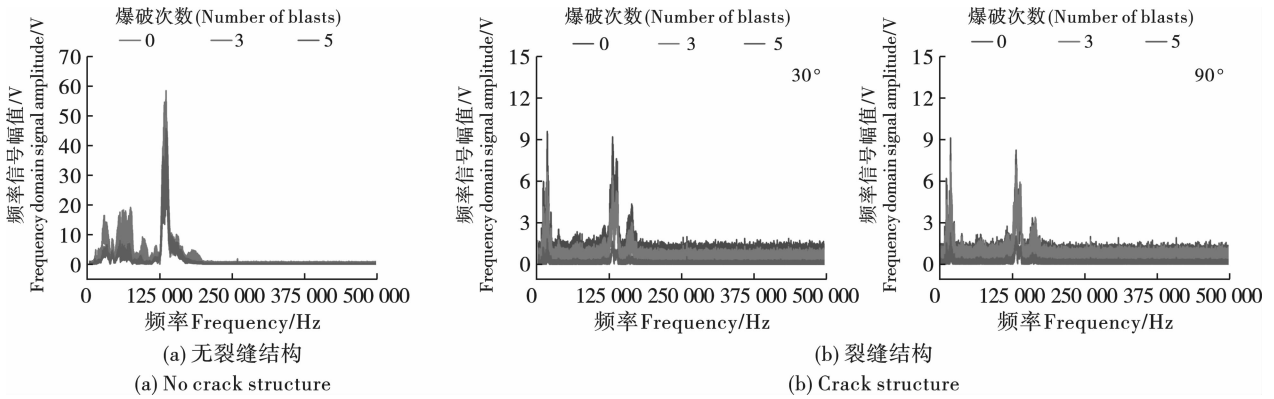


图 14 不同工况下结构主动频域信号分布规律

Fig. 14 Active frequency domain signal distribution of the structure under different working conditions

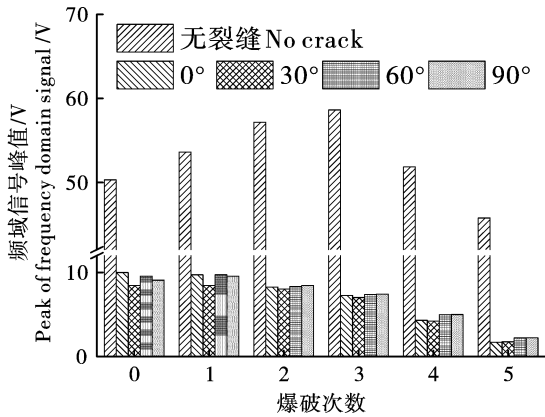


图 15 不同工况下结构主动频域信号峰值

Fig. 15 Peak value of active frequency domain signal under different working conditions

3.2.3 信号能量分析

图 16 展示了不同工况下压电主动频域信号的能量分布情况。图 16(a) 为无裂缝结构的频域信号能量分布。从图中可以看出，在不同爆破次数下，无

裂缝结构的信号能量主要集中在  $S_{3,2}$  频段，其能量占比最高，在 51.1% 到 65.7% 之间。其次为  $S_{3,1}$  频段和  $S_{3,0}$  频段，能量占比最高分别为 30.0% 到 33.4% 和 4.1% 到 15.1%。而在  $S_{3,3}$  到  $S_{3,7}$  频段，能量占比基本为零，表明这些高频段在无裂缝结构中几乎没有信号能量分布。

图 16(b) 为裂缝结构的频域信号能量分布(以 30° 和 90° 裂缝为例)。裂缝结构的信号能量分布与无裂缝结构存在显著差异。在  $S_{3,2}$  频段，裂缝结构的能量占比仍为最高，但占比范围有所变化:30° 裂缝结构能量占比为 25.7% 到 45.0%，90° 裂缝结构为 37.9% 到 43.7%。其次为  $S_{3,0}$  频段，30° 裂缝结构的能量占比在 17.8% 到 28.1% 之间，90° 裂缝结构在 23.1% 到 26.8% 之间。此外，裂缝结构在  $S_{3,3}$  到  $S_{3,7}$  频段的能量占比分别为 3.3%、3.3% 和 2.8%，这同样表明裂缝的存在使其信号向更高频段转移。

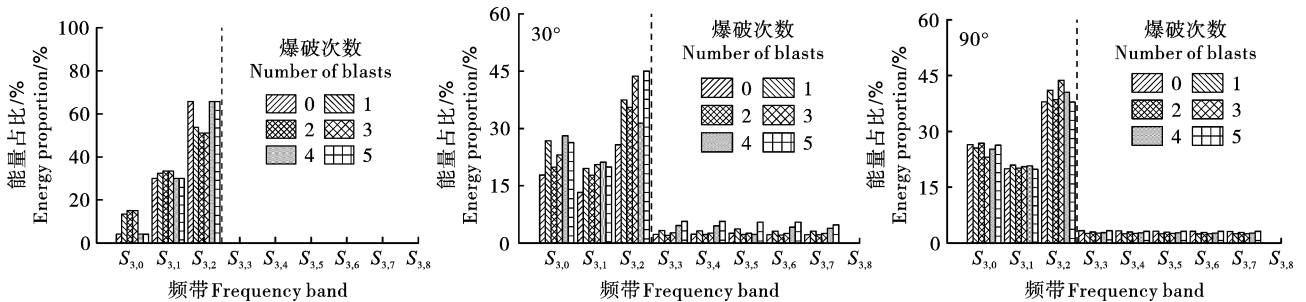


图 16 不同工况下结构频域信号能量沿频带的分布规律

Fig. 16 Distribution law of signal energy in structural frequency domain along frequency band under different working conditions

根据公式(4)，计算了不同工况下频域信号的总能量，其分布情况如图 17 所示。从图中可看出，

无裂缝结构的频域信号总能量显著高于裂缝结构。此外,裂缝角度越小,信号总能量的衰减速率越快,表明小角度裂缝对结构完整性的削弱作用更为显著。总体而言,结构频域信号的总能量分布与图16中展示的频域信号沿频带的能量分布规律随结构角度的变化规律具有高度一致性,这与公式(3)中描述的信号能量计算原理相契合。这一结果表明,通过小波包分解得到的频域信号总能量是合理且可靠的,能够进一步详细地反映结构在爆破作用下的损伤变化情况,为评估爆破前后结构的健康状态提供了一种有效的量化指标。

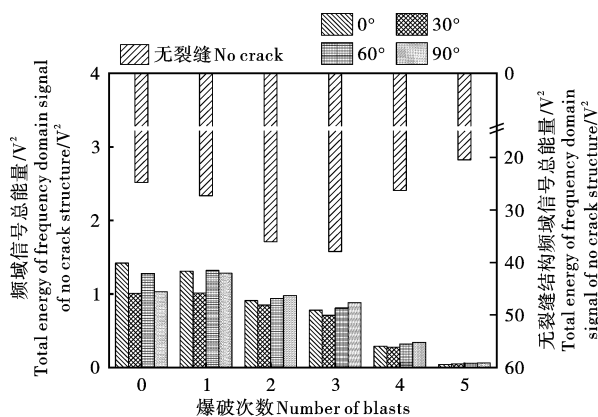


图17 不同工况下结构频域信号总能量分布

Fig. 17 Total energy distribution of structural frequency domain signals under different working conditions

## 4 结论

以旦架哨隧道改扩建工程为背景,基于既有隧道衬砌裂缝的分布特征,开展了循环爆破作用下,不同的结构裂缝角度(0°、30°、60°、90°)对其振动响应的影响规律试验研究,主要结论如下:

1) 压电被动监测技术可用于表征爆破过程中结构的瞬时响应规律,而压电主动监测技术则可用于评估爆破后结构的损伤情况。二者结合形成了一种互补性的评价方法,能够全面、动态地反映爆破作用下结构的瞬时响应和损伤特征,为隧道改扩建工程中的爆破安全控制提供了重要的技术支持。

2) 爆破作用对裂缝迎爆侧结构处的压电被动信号具有显著的放大效应,且裂缝角度越大,放大效应越明显。这一现象表明裂缝角度对信号响应应具有显著的方向性影响。

3) 在循环爆破作用下,结构损伤程度与压电主动信号的幅值衰减及能量耗散呈正相关关系。裂缝与爆破波传播方向夹角越小,结构损伤速度越快,累积损伤程度也越严重。此外,当结构存在裂缝时,其

频域信号分布向高频段偏移,这一现象揭示了裂缝对结构内部应力波传播路径和能量分布的显著影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱昆,赵晖,钟志芳,等.小净距隧道爆破开挖振动控制措施探讨[J].建筑经济,2024,45(S1):536-539.
- [1] ZHU Kun, ZHAO Hui, ZHONG Zhi-fang, et al. Study on vibration control measures for blasting excavation of small clear distance tunnel [J]. Construction economy, 2024, 45(S1):536-539. (in Chinese)
- [2] 李小帅,高文学,宿利平,等.小净距隧道掘进爆破及其振动响应规律研究[J].爆破,2024,41(2):194-202.
- [2] LI Xiao-shuai, GAO Wen-xue, SU Li-ping, et al. Study on attenuation law of blasting vibration in a small clear distance highway tunnel [J]. Blasting, 2024, 41(2):194-202. (in Chinese)
- [3] 马跃原,何宏海,张勇,等.小净距大断面隧道先行洞爆破振动响应特性分析及其安全控制[J].爆破,2023,40(2):172-179,216.
- [3] MA Yue-yuan, HE Hong-hai, ZHANG Yong, et al. Analysis of blasting vibration response (characteristics and safety control of front tunnel with small clear distance and large section [J]. Blasting, 2023, 40(2):172-179, 216. (in Chinese)
- [4] 罗阳,杨建辉,胡东荣.小净距隧道围岩的爆破振动影响规律研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1309-1313,1336.
- [4] LUO Yang, YANG Jian-hui, HU Dong-rong. Study on the impact of blasting vibration on surrounding rock of small clearance tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4):1309-1313, 1336. (in Chinese)
- [5] 李秀地,蒋树屏,刘元雪,等.小净距新建隧道爆破对运营隧道的影响与控制[J].地下空间与工程学报,2016,12(6):1631-1636.
- [5] LI Xiu-di, JIANG Shu-ping, LIU Yuan-xue, et al. Blasting effect and control of new tunnel with small clear space on existing operation tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6):1631-1636. (in Chinese)
- [6] 朱正国,孙明路,朱永全,等.超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J].岩土力学,2012,33(12):3747-3752,3759.
- [6] ZHU Zheng-guo, SUN Ming-lu, ZHU Yong-quan, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3747-3752, 3759. (in Chinese)

- nese)
- [7] 高成路,李术才,林春金,等. 隧道衬砌渗漏水病害模型试验系统的研制及应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(4):1614-1622.
- [7] GAO Cheng-lu, LI Shu-cai, LIN Chun-jin, et al. Development and application of model test system for water leakage disease in tunnel lining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4):1614-1622. (in Chinese)
- [8] 汪波,郭新新,王志伟,等. 新建隧道爆破施工对既有裂缝病害隧道的动力响应分析[J]. 爆破, 2019, 36(1):90-96.
- [8] WANG Bo, GUO Xin-xin, WANG Zhi-wei, et al. Caused dynamic response of existing tunnel with cracks to blasting excavation of newly-built tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1):90-96. (in Chinese)
- [9] WANG Chen-yu, WANG Ning, HO Siu-chun, et al. Design of a novel wearable sensor device for real-time bolted joints health monitoring[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6):5307-5316.
- [10] CUI Er-jiang, ZUO Chun-yuan, FAN Mu-ning, et al. Monitoring of corrosion-induced damage to bolted joints using an active sensing method with piezoceramic transducers[J]. Journal of Civil Structure Health Monitoring, 2021, 11(2):1-10.
- [11] SI Jian-feng, XIONG Wei, ZHONG Dong-wang, et al. Piezoelectric-based damage-depth monitoring method for underwater energy-relief blasting technique[J]. Journal of Civil Structure Health Monitoring, 2021, 11(2):1-14.
- [12] HE Li, PENG Sheng, YAO Ying-kang, et al. Experimental research and theoretical analysis on blasting fragmentation of concrete structural system using piezoelectric smart sensors[J]. Journal of Civil Structure Health Monitoring, 2022, 13(8):1537-1549.
- [13] 陈彦,马禧祥,李全,等. 高速铁路富水黄土隧道二衬裂缝整治技术研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(29):172-175.
- [13] CHEN Yan, MA Xi-xiang, LI Quan, et al. Research on treatment technology for cracks in the second lining of high-speed railway water-rich loess tunnel[J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(29):172-175. (in Chinese)
- [14] 来弘鹏,杨晓华,林永贵. 黄土公路隧道衬砌开裂分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007(1):45-49.
- [14] LAI Hong-peng, YANG Xiao-hua, LIN Yong-gui. Analysis on lining cracks of highway tunnel in loess area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007(1):45-49. (in Chinese)
- [15] 赵刚. 黄土公路隧道带裂缝衬砌安全性评价[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [15] ZHAO Gang. The safety evaluation of cracked highway tunnel lining in loess area[D]. Xi'an:Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [16] 乔雄,杨鑫. 黄土隧道二次衬砌开裂原因及防治措施现状与发展[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10):1657-1676.
- [16] QIAO Xiong, YANG Xin. Current situation and development of causes of secondary lining crack in loess tunnel and countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(10):1657-1676. (in Chinese)
- [17] LI Li-ping, JIN Hao, TU Wen-feng, et al. Study on the minimum safe thickness of water inrush prevention in karst tunnel under the coupling effect of blasting power and water pressure [J]. Tunnel Underground Space Technology, 2024, 153:105994.
- [18] 卓武,张伟,丁海燕,等. 基于电火花震源的微测井技术在复杂沙漠地区的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5):1988-1995.
- [18] ZHUO Wu, ZHANG Wei, DING Hai-yan, et al. Microwell logging techniques based on spark source in complex desert areas [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5):1988-1995. (in Chinese)
- [19] 尹玉雪,苗媛媛,万珂,等. 基于 Daubechies 小波基的木材声学振动信号分析与评价[J]. 林业工程学报, 2021, 6(5):68-75.
- [19] YIN Yu-xue, MIAO Yuan-yuan, WAN Ke, et al. Analysis and evaluation of wood acoustic vibrationsignal based on Daubechies wavelet base [J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(5):68-75. (in Chinese)

(上接第 193 页)

- [16] 陈柏宇,管登高,彭燕,等. 剪切增稠液及其复合材料的研究进展[J]. 橡胶工业, 2024, 71(4):312-319.
- [16] CHEN Bai-yu, GUAN Deng-gao, PENG Yan, et al. Research progress in shear thickening fluid and their composites[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(4):312-319. (in Chinese)
- [17] TANG Fan, DONG Cheng, YANG Zhe, et al. Protective performance and dynamic behavior of composite body armor with shear stiffening gel as buffer material under ballistic impact [J]. Composites Science and Technology, 2022, 218:109190.