

隧道施工复杂环境声波探测数据恢复提取与探测方法

叶胜酩^{1,2}, 王瑞^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 张相超³, 陈磊^{1,2*}, 曹弘毅^{1,2}

(1.隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 山东大学, 山东 济南 250061; 2.山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 3.兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿, 山东 菏泽 274705)

摘要:为获取岩体内部不良地质的探测反射声波,需要将传感器安装于隧道边墙进行地震波震动采集。然而,隧道岩体开挖面凹凸不平,传感器耦合受影响,振幅、波形等特性采集失真;同时,隧道电机、泵站多作业工序产生强噪声,干扰隧道不良地质声波响应的识别提取。对此,本研究提出基于声波衰减补偿和去噪的隧道施工不良地质探测方法,重点针对开挖产生的非平整岩体表面,通过数值仿真揭示不同耦合形式下的声波信号特征,优选适用声波采集的干耦合材料,同时针对非平整面声波传播能量衰减,基于实测数据分析振幅衰减规律,基于巴特沃斯滤波构建非平整面声波传递振幅衰减补偿方法,改进基于经验模态分解与小波变换联合的声波噪声压制方法,实现高分辨声波反射波场的识别与提取。上述方法在鄂庄煤矿巷道前方实际工程岩体表面得到了成功验证,试验结果表明,该方法能有效提高隧道非平整岩面的声波信号质量,有利于识别不良地质的声波响应信号,为隧道前方不良地质探测提供了指导。

关键词:隧道不良地质探测;声波探测;波场特征;衰减补偿;噪声压制

中图分类号:P631;TU43 **文献标志码:**A

引用格式:叶胜酩,王瑞,陈龙,等.隧道施工复杂环境声波探测数据恢复提取与探测方法[J].山东大学学报(工学版),2026,56(2):96-111.

YE Shengming, WANG Rui, CHEN Long, et al. The data recovery, extraction and detection methods of acoustic wave detection in complex tunnel construction environments[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):96-111.

The data recovery, extraction and detection methods of acoustic wave detection in complex tunnel construction environments

YE Shengming^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, ZHANG Xiangchao³, CHEN Lei^{1,2*}, CAO Hongyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Zhaolou Coal Mine of Yanzhou Coal Heze Energy & Chemical Co., Ltd., Heze 274705, Shandong, China)

Abstract: To acquire the detected reflected acoustic waves of unfavorable geology inside the rock mass, sensors needed to be installed on the tunnel sidewalls for seismic wave vibration collection. However, the excavated surface of the tunnel rock mass was uneven, which affected the coupling of sensors and led to distortion in the collection of characteristics such as amplitude and waveform. Meanwhile, strong noise was generated by multiple operating processes including tunnel motors and pump stations, which interfered with the identification and extraction of acoustic wave responses related to unfavorable geology in the tunnel. In response to these issues, a method for detecting unfavorable geology in tunnel construction based on acoustic wave attenuation compensation and denoising was proposed in this research. Focusing on the uneven rock mass surface caused by excavation, the acoustic wave signal characteristics under different coupling forms were revealed through numerical simulation studies, and the dry coupling materials suitable for acoustic wave collection were optimally selected. At the same time, aiming at the energy attenuation of acoustic wave propagation on uneven surfaces, the amplitude attenuation law was analyzed based on measured data. An amplitude attenuation compensation method for acoustic wave transmission on uneven surfaces was constructed based on Butterworth filtering, and the acoustic wave noise suppression method combined with empirical mode decomposition (EMD) and wavelet transform was improved. Through these measures, the identification and extraction of high-resolution acoustic wave reflected wavefields were

收稿日期:2025-06-23

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项资助项目(2024ZD1003907)

第一作者简介:叶胜酩(2000—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为隧道地震波超前探测。E-mail:sduysm@163.com

*通信作者简介:陈磊(1990—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为地下工程地震波探测。E-mail:clei667@163.com

realized. The above method was successfully verified on the surface of the actual engineering rock mass in front of the roadway of Ezhuang Coal Mine. The test results showed that the quality of acoustic wave signals on the uneven rock surface of the tunnel was improved, which was conducive to identifying the acoustic wave response signals of unfavorable geology and provided guidance for the detection of unfavorable geology in front of the tunnel.

Keywords: geological condition detection of tunnel; acoustic wave detection; wave field observation; attenuation compensation; noise suppression

0 引言

我国多个城市的地铁正处于规划与建设阶段,随着地下基础设施建设规模的不断扩大,城市地铁发展态势日趋迅猛。据不完全统计,截至2024年底,我国城市轨道交通运营里程已突破11 949 km,其中地铁里程达9 498.3 km,占比约80.3%;仅2024年,就新增开通过路线25条,新增运营里程约979 km,充分反映出城市地铁网络在建设速度与覆盖范围上的显著提升,进一步印证了我国城市轨道交通体系的高速发展态势^[1]。盾构机等机械法施工具有施工扰动小、掘进速度快等优势,已成为城市地下隧道建设的主要工法^[2-3]。然而,城市地质条件极为复杂,赋存岩溶、复合地层、孤石等多种不良地质体,若未能在施工前探明其分布,在掘进扰动下易导致塌方、突水等灾害^[4-5]。如厦门地铁2号线施工遭遇孤石群,导致工期延误;青岛地铁某工程施工发生地面坍塌事故,导致1人遇难。由上可知,地质灾害源对城市地下隧道施工产生安全风险^[6-9],亟需提前探明不良地质并及时处置。

地球物理方法因具有无损、高效等特点,被广泛用于隧道地质超前探测。其中,高频声波具有探测精度高、对地质体结构(界面)敏感等优势,是孤石、岩溶等中小型致灾构造精细探测的优选方法^[10]。声波在岩体中传播时遇到结构面时会产生反射波,通过分析反射波携带信息可反算地质情况。对于隧道环境不良地质声波探测,其关键在于对目标体声波反射的高分辨感知^[11-12]。高频声波常被用于混凝土的无损检测,因检测目标深度小、接触面平整、施作环境噪声小,易于获取较高精度的信号数据。然而,隧道施工环境复杂,不良地质声波探测面临新需求:(1)开挖扰动作用下隧道岩体表面凹凸不平,声波传感器与岩体接触面难以较好耦合,导致采集声波信号发生强衰减;(2)隧道施工环境中存在电机、泵站等多源强噪声,噪声与有效反射声波混叠,导致有效信号辨识难^[13]。综上,非平整面声波耦合与振幅补偿、干扰去除等亟待开

展创新研究。

围绕传感器耦合和信号提取,国内外学者开展了长期研究。在传感器耦合接收方面,研究者们在传感器耦合装置、材料等方面进行了研究,文献[14]在不同表土条件下使用钢制螺旋尾锥、钢制普通尾锥和无尾锥的检波器进行接收试验,并进行能量传递影响分析,探究尾锥与地表耦合阻尼对振动能量传递及地震信号品质的作用,最终优选了检波器形式;文献[15]通过理论推导声波在梯度声阻抗多层介质中的传播规律、利用COMSOL进行数值模拟以及离心法制备材料并搭建平台开展试验验证,结合声强传输系数计算、有限元模拟能量传播和回波信号能量分析,优选出指数梯度声阻抗匹配层干耦合传感器。然而,在隧道开挖场景中,岩体表面通常呈现非平整状态。这种非平整特性会导致探头与岩石的实际接触面积减小,进而使得耦合效果大打折扣。而耦合效果的弱化,又会直接造成阵列声波采集数据的质量下降。因此,分析凹凸不平表面对波场传感的影响,亟待进一步深入研究。

在噪声干扰去除方面,国内外学者研究了多种去噪方法,代表性方法包括经验模态分解^[16]、独立成分分析、傅里叶变换^[17]、小波变换^[17]、奇异值分解^[18]等。其中,经验模态分解方法因具备不依赖先验信息、精度高等特点而被广泛应用。例如,针对白噪声干扰去除难题,文献[19]提出了基于经验模态分解虚拟通道的独立成分分析去噪方法;在此基础上,文献[20]在信号中引入噪声尺寸分离思想,提出了集合经验模态分解方法,提高了信号的平稳性。此外,完全自适应噪声集合经验模态分解方法被提出,通过分解后模态信号中的噪声相互抵消,进一步提高了噪声去除能力^[21]。然而,鉴于隧道复杂环境中存在的强背景噪声、多源干扰信号耦合严重以及传统经验模态分解方法在处理含有周期性噪声信号时易产生模态混叠现象、多次迭代分解导致计算效率低下等问题,亟需探索基于经验模态分解与其他滤波方法的联合滤波技术,开展多算法协同优化的创新研究,以实现隧道环境下复杂噪声的高效抑制与信号特征的精确提取。

本研究针对隧道复杂环境声波探测,围绕波场衰减波场和干扰去除开展创新研究。首先,研究揭示不同耦合面积下波场衰减特征,优选声波干耦合材料,提高了声波信号感知能力;随后提出基于巴特沃斯滤波的声波信号补偿恢复方法,以此提升接收信号的数据质量;在此基础上,提出基于经验模态分解与小波变换的联合噪声滤除方法,实现了噪声压制。最终形成了集声波衰减补偿与去噪于一体的隧道施工不良地质探测方法,成功应用于济南某铁矿巷道,探明了前方的岩体界面,验证本研究方法的可行性。

1 隧道开挖岩体非平整面波场特征

1.1 非平整面岩体声波特征与耦合方法

在爆破、掘进等不同工法破岩作用下,隧道边墙岩体表面呈现不同的结构特征,影响了传感器与

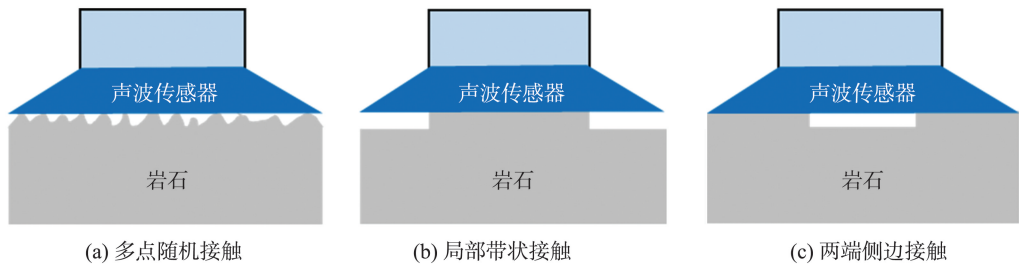


图1 声波传感器和开挖岩体的3种接触形式

Fig.1 Three contact forms of acoustic wave sensor and excavated rock mass

针对非平整岩面,为采集目标体的声响应信息,需要耦合剂填充。耦合形式可分为干耦合和液体耦合两种:(1)干耦合是借助外载荷的作用,通过橡胶等塑性材料填充声波传感器与非平整岩面之间的空隙,从而提升声波传播效果^[25];(2)液体耦合利用液体(如甘油、黄油、凡士林)作为介质填充传感器和岩面间的空隙,减少声波在传递中的振幅衰减^[26-27]。在隧道施工环境中,在传感器上涂抹液体材料困难,因此本研究采用干耦合方式并进行效果分析。其中硅橡胶材料具有耐高低温、抗腐蚀、高弹性、长寿命等特性,所以选取硅橡胶作为本次试验的干耦合材料。一般情况下,声波传感器接收到的回波相对幅值 A ^[27]可表示为

$$A = \frac{4Z_0Z_1}{(Z_0+Z_1)^2} \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} (1-r_{23}^2) e^{-2\alpha_1d_1} e^{-2\alpha_2d_2} e^{-2\alpha_3d_3}, \quad (1)$$

式中, d_1 、 α_1 分别为保护层的厚度和声衰减系数, d_2 、 α_2 分别为干耦合层的厚度和声衰减系数, d_3 、 α_3 分别为岩石的厚度和声衰减系数, r_{23} 为干耦合材料

岩体的接触耦合面积,对声波信号感知与采集产生了不利影响。根据隧道施工破岩环境,可将开挖岩体面初步分为两类^[22-24]。

(1)TBM施工同心圆刀辙岩面。TBM施工掘进时,受到刀盘上滚刀对岩体的挤压、切削等作用,岩体会以TBM刀盘中心形成同心圆刀辙,相邻滚刀间的岩石存在脱落现象。

(2)钻爆法施工凹凸起伏岩面。在炸药爆破等作用影响下,近爆源处岩体被粉碎成块状或颗粒状,裂隙密集,常见径向与环向交叉裂缝;同时岩体破碎爆破中心附近形成凹陷或漏斗状坑洞,周围岩体被抛掷或松动,因此在隧道边墙形成凹凸不平的岩体界面。

上述情况下,开挖岩体表面的平整度差异较大,导致传感器接触面与岩体难以较好耦合。根据隧道岩体非平整面结构特征,本研究将传感器接触耦合形式概化为3种模式,如图1所示。

层与岩石界面的声反射率, Z_0 、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为压电晶片、保护层、干耦合层以及岩石的声阻抗。

已知干耦合模式下,回波振幅受耦合材料的厚度、声阻抗、声衰减系数、硬度等因素影响。为优化耦合材料的参数,开展了系统的数值仿真模拟研究。在数值计算过程中,本研究采用4 kHz主频的声波源进行仿真,揭示了回波振幅和耦合材料参数的相关关系,如图2所示。

(1)材料厚度对回波幅值的影响:如图2(a)所示,随着载荷增大,各厚度下材料的相对回波幅值均增大;同一载荷下,材料厚度的数值越小(如5 mm),相对回波幅值越高,材料厚度的数值越大(如30 mm),相对回波幅值越低,并且小厚度材料(5、10 mm)相对回波幅值随载荷变化更加敏感。以140 kPa载荷为例,5 mm的相对回波幅值约0.008 5,30 mm约0.006,最大幅值相差近42%,体现出小厚度材料在增强回波幅值方面的显著优势。

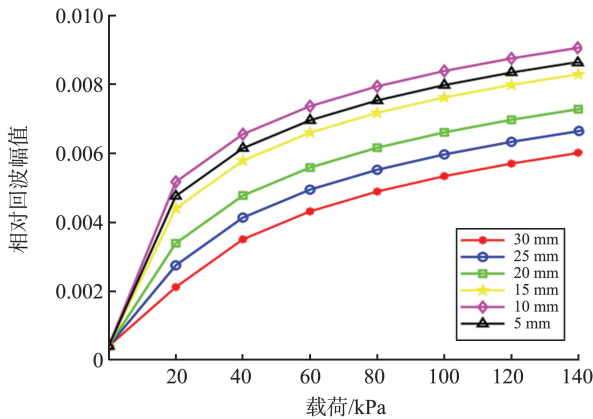
(2)材料硬度对回波幅值的影响:如图2(b)所示,随着载荷增大,各硬度下材料的相对回波幅

值均增大;同一载荷下,材料硬度的数值越小(如20 HA),相对回波幅值越高,材料硬度的数值越大(如50 HA),相对回波幅值越低,并且低硬度材料(20、30 HA)相对回波幅值随载荷变化更敏感。以140 kPa载荷为例,20 HA的相对回波幅值约0.003 3,50 HA约0.002 6,最大幅值相差近27%,体现出低硬度材料在提升回波幅值方面的明显优势。

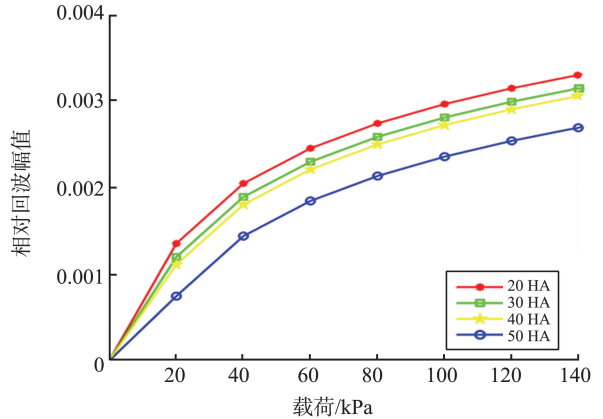
(3)材料声阻抗对回波幅值的影响:如图2(c)所示,不同声阻抗材料,随着载荷增大,相对回波幅值均呈现增大趋势。同一载荷条件下,声阻抗越小(如1.0 Mrayl),相对回波幅值越低;声阻抗越大(如2.0 Mrayl),相对回波幅值越高。且高声阻抗材料(如1.8、2.0 Mrayl)的幅值随载荷变化更敏感,斜率

更陡。以140 kPa载荷为例,1.0 Mrayl幅值约0.009,2.0 Mrayl达0.018,提升了约100%,体现出高声阻抗对回波幅值的显著增强作用。

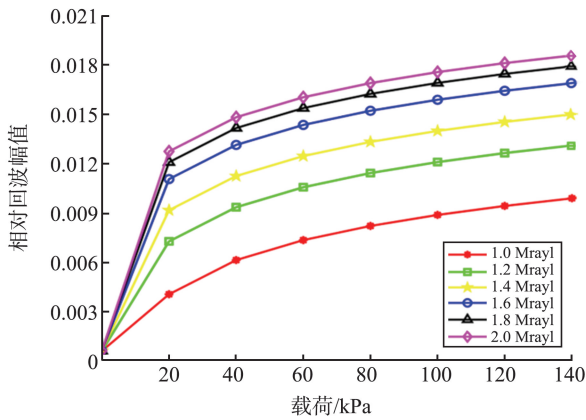
(4)材料声衰减对回波幅值的影响:如图2(d)所示,不同声衰减系数(0.5、1.0 dB/mm等)的材料,随载荷增大,相对回波幅值均呈上升趋势。同一载荷下,声衰减系数越小(如0.5 dB/mm),相对回波幅值越高;声衰减系数越大(如3.0 dB/mm),相对回波幅值越低。且声衰减系数小的材料(如0.5、1.0 dB/mm),幅值随载荷变化更敏感。以140 kPa载荷为例,0.5 dB/mm材料的回波幅值约0.003 2,3.0 dB/mm材料的回波幅值约0.001 8,最大回波幅值相差近78%,体现出低声衰减系数对提升回波幅值的显著作用。



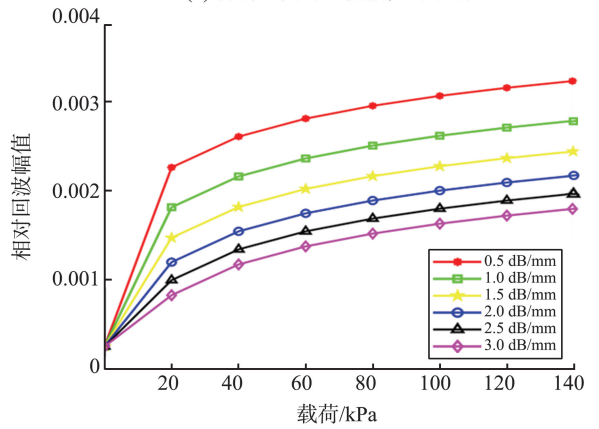
(a) 材料厚度对回波幅值的影响



(b) 材料硬度对回波幅值的影响



(c) 材料声阻抗对回波幅值的影响



(d) 材料声衰减对回波幅值的影响

图2 回波相对幅值与干耦合材料参数的关系

Fig.2 Relationship between amplitude of echo and dry-coupled material parameters

通过上述研究可知,耦合参数对回波幅值影响的重要程度为:声阻抗参数>材料声衰减特性>材料厚度>材料硬度(这个排序根据140 kPa时的增幅比例来排序)。其中,耦合参数中的材料厚度和硬度对回波幅值的影响相对较小。通过上述研究,选取10 mm厚、声阻抗为2.0 Mrayl的硅橡胶作为耦合材料开展研究。

为了进一步优化耦合参数中的材料厚度和声阻抗系数,开展了实测验证。试验参数具体如下:干耦合材料厚度分别设置为5、10和15 mm;声阻抗系数分别设置为1.2、1.6和2.0 Mrayl,共开展9组试验。声阻抗为2.0、1.6、1.2 Mrayl时,不同厚度(5、10和15 mm)耦合材料采集的声波信号如图3(a)、(b)、(c)所示。分析表明,在声阻抗参数分别

为 2.0、1.6 和 1.2 Mrayl 时,10 mm 厚度的耦合材料均呈现信号振幅最大值,与仿真模拟结果基本一致,因此选取 10 mm 厚度。在此基础上,继续研究在厚度为 10 mm 的硅橡胶材料下,不同声阻抗系数对回波幅值的影响程度。图 3(d) 显示,随着声阻抗值的增大,相对回波幅值随之提高。当声阻抗值为

2.0 Mrayl 时,声波幅值达到最大值约 135 mV,与声阻抗值为 1.2 Mrayl 相比提升了约 107.69%。综上所述,选取 10 mm 厚度的硅橡胶、声阻抗值为 2.0 Mrayl 时,该组参数下相对回波幅值最大。因此,在实际探测中采用该参数硅橡胶能够实现较好耦合,有效提升声波信号的振幅数值和采集质量。

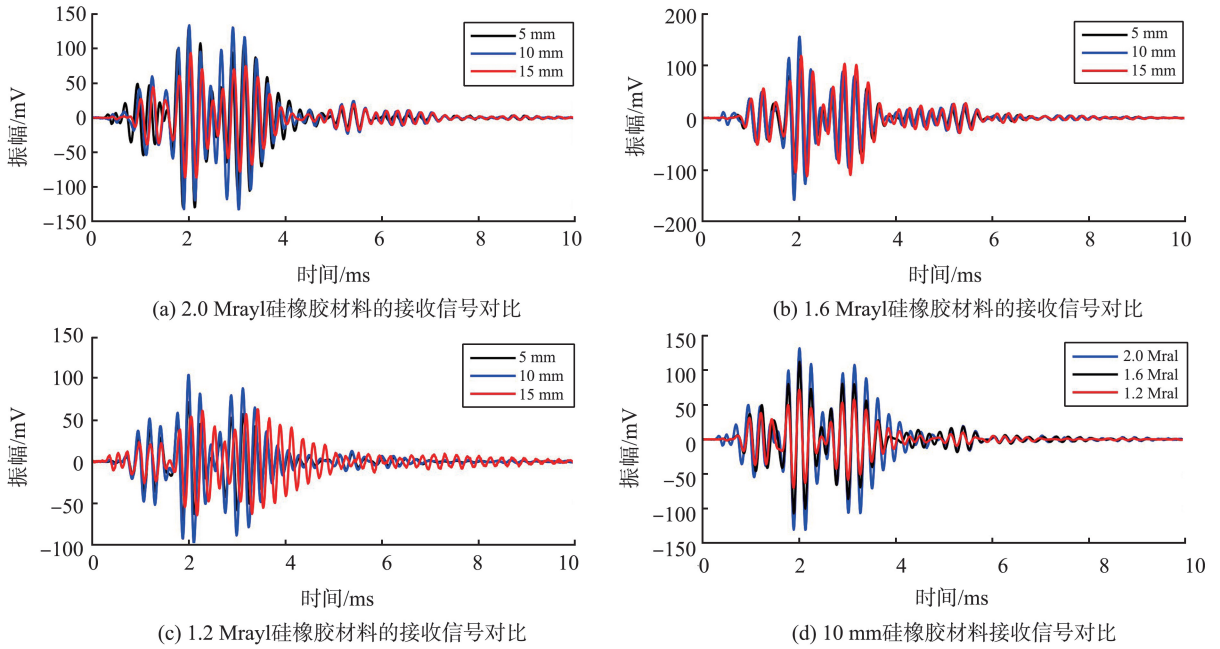


图3 硅橡胶材料接收信号对比

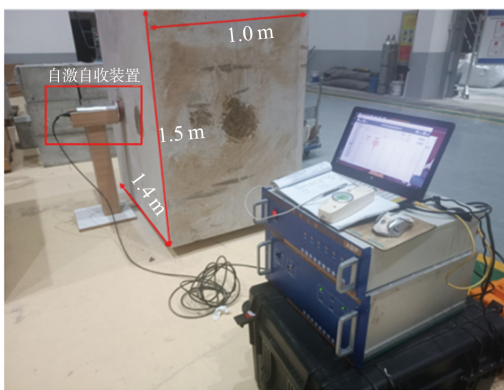
Fig.3 Silicone rubber material received signal comparison

1.2 岩体非平整面耦合声波衰减特征

1.2.1 接触面积对声波传播的影响特征

为研究接触面积对传感器采集声波信号特征的影响,基于风化花岗岩开展试验研究。试验目标体为 1.0 m×1.4 m×1.5 m 的花岗岩岩石,在长度为 1.4 m 的边上做透射试验,透射距离为 1.0 m,激发传感器和接收传感器位于岩面的中心位置,如图 4

所示。试验所采用的岩石介质模型波速约为 2 800 m/s,岩石与声波传感器通过硅胶垫进行耦合,根据实际工程中材料与传感器之间的接触面积为例,调整硅胶垫与传感器的接触面积进行研究:波扩完整接触(全接触)、84.1%面积接触、68.5%面积接触、53.4%面积接触、39.1%面积接触、14.3%面积接触等情况。



(a) 试验方案



(b) 全接触



(c) 84.1%接触



(d) 53.4%接触



(e) 14.3%接触

图4 不同接触面积试验

Fig.4 Different contact area experiments

在激发传感器保持完整接触的前提下,接收传感器与岩石接触面积分别为 100%、68.5%、14.3%

3 种情况,其对应的信号响应对比如图 5 所示。图中标识①为透射初至波,标识②为二次波与横波

叠加形成的包络信号,标识③则是由多次波叠加构成的包络信号。分析表明,接触面积的变化并未导致波形形态发生显著改变:接收信号在完整接触与68.5%接触面积下的接收信号相似度达96.5%,影响较小;然而,当接触面积降低至14.3%时,相似度下降至79.7%。需要特别注意的是,接收信号的幅值随接触面积减小而呈现出明显的衰减趋势:在68.5%接触面积下,振幅幅值仅为完整接触状态下的31.3%;在14.3%接触面积下,信号幅值更降至完整接触时的6%。3种接触面积下接收信号的频谱对比结果如图6所示,表明信号频谱特征随着接触面积变化未发生明显改变。

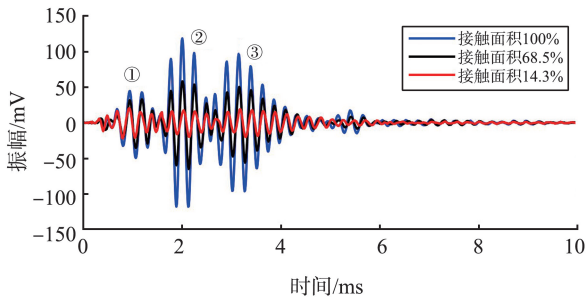


图5 接收信号对比图
Fig.5 Received signal comparison

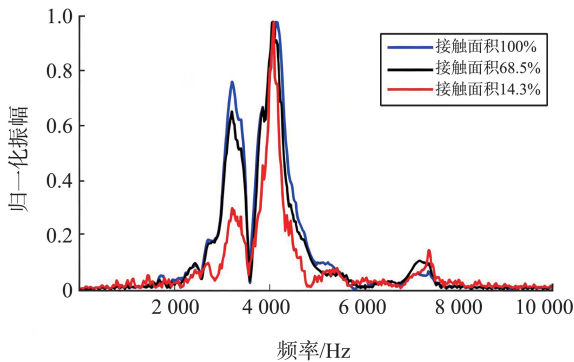
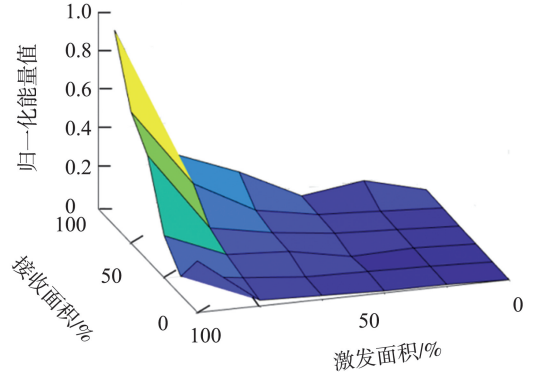
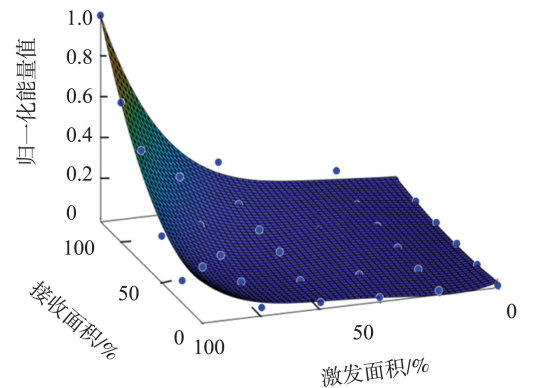


图6 频谱对比图
Fig.6 Spectrum comparison

为探究非平整接触状态下对接收信号能量的影响,以初至波能量作为基准参照,进而分别计算激发传感器与接收传感器在不同接触面积组合下对应的接收信号能量。这些实测数据所反映的能量变化规律如图7(a)所示:其横、纵坐标分别代表激发传感器和接收传感器的接触面积(具体取值为84.1%、68.5%、53.4%、39.1%、14.3%),竖轴表示归一化后的能量值。为了简化计算过程,对该数值矩阵进行非线性拟合,拟合后的能量变化趋势如图7(b)所示。可以发现,随着接收面积和激发面积的减小,归一化能量值呈逐步下降趋势,且该能量衰减特性与数值模拟结果相符。



(a) 实测数据能量变化规律



(b) 拟合后能量变化规律

图7 实测数据能量变化规律
Fig.7 Change rule of measured data energy

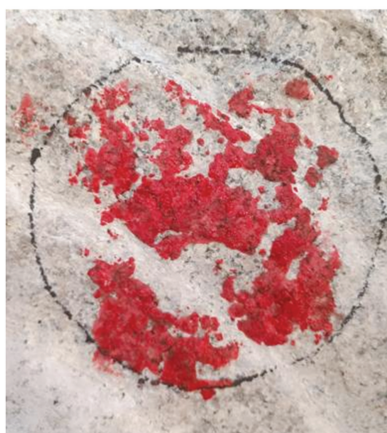
1.2.2 非平整岩体试验

为了验证实测能量变化规律的可靠性,本试验选取滚刀破岩后的同类花岗岩作为样本,对其非平整接触特性进行了专项测试。试验中,在破碎岩石表面选取若干个激发点与接收点,以对穿模式采集声波信号。滚刀作用形成的风化花岗岩试验模型如图8所示,以位置①和位置②为例,通过在声波传感器表面喷涂红色涂料来直观标记实际接触区域,并通过计算红色标记面积占传感器总面积的百分比(即接触面积比)来进行定量分析。本研究选取8个对穿位置开展验证工作,激发面积与接收面积的具体数值如表1所示。为进一步分析能量变化与接触面积比的关联,同时为验证差值所得能量变化规律的有效性提供可视化数据支撑,剩余6个测点的接收信号能量,与前面叙述的两测点及差值所得的能量变化进行了对比,如图9所示。从散点分布看,接触面积比为0.2~0.5时,能量整体随接触面积比增大呈上升趋势;接触面积比在0.5附近有波动,整体无严格线性规律,但存在一定正相关倾向。综上所述,刀盘破岩现场实测信号的能量变化特征,验证了插值所得能量变化规律的有效性。



(a) 风化花岗岩模型一侧

(b) 风化花岗岩模型另一侧



(c) 位置1激发探头接触面积



(d) 位置1接收探头接触面积



(e) 位置2激发探头接触面积



(f) 位置2接收探头接触面积

图8 滚刀破岩后的风化花岗岩模型

Fig.8 Model of weathered granite after hob breakage

表1 激发和接收传感器接触面积

Table 1 Excitation and receiving probe contact areas

位置	激发面积/%	接收面积/%	接触面积比	能量
位置1	41.37	52.62	0.526 2	0.055
位置2	37.14	45.26	0.452 6	0.050
位置3	33.87	40.02	0.400 2	0.090
位置4	32.25	49.78	0.497 8	0.100
位置5	29.65	52.61	0.526 1	0.120
位置6	46.42	86.52	0.865 2	0.110
位置7	28.39	30.32	0.303 2	0.030
位置8	25.18	24.94	0.249 4	0.025

注:接触面积比=接收面积/100。

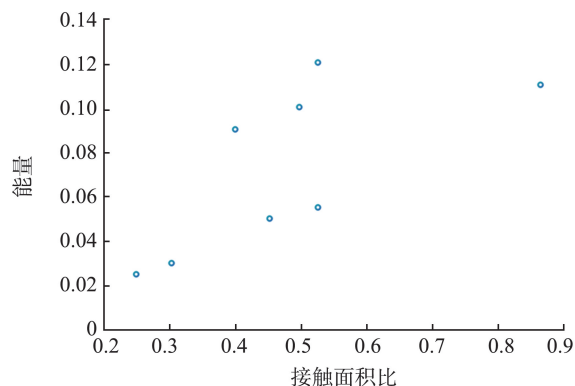


图9 不同接触情况下信号能量对比

Fig.9 Comparison of signal energy for different contact situations

2 基于声波衰减补偿与噪声去除的隧道声波探测方法

2.1 基于巴特沃斯滤波的声波衰减补偿方法

为提高传感器信号能量低、难提取的问题,形成了声波振幅衰减补偿方法。通过现场实测发现,盾构施工环境噪声频率较低(约为10~2 000 Hz),其中声波激发主频为4 000 Hz,而噪声主频主要分布在1 000 Hz左右的频段,二者存在较大的频率差异。针对这一特性,提出了基于巴特沃斯滤波的声波衰减补偿方法,该滤波方法能够有效滤除噪声信号中的低频和低频成分,进而实现对目标声波信号的精准优化。同时利用能量变化规律对主频信号进行振幅补偿,具有稳定性高、精度高等优势。系统函数^[28]为

$$H(s)H(-s) = |H(e^{j\omega})|^2_{\omega=s/j} = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{j\omega_c}\right)^{2N}}, \quad (2)$$

$$H(j\omega) = 1/\sqrt{\left(1 + (\omega/\omega_c)^{2N}\right)}, \quad (3)$$

式中: $H(s)$ 为滤波器在拉普拉斯域中的传输函数,

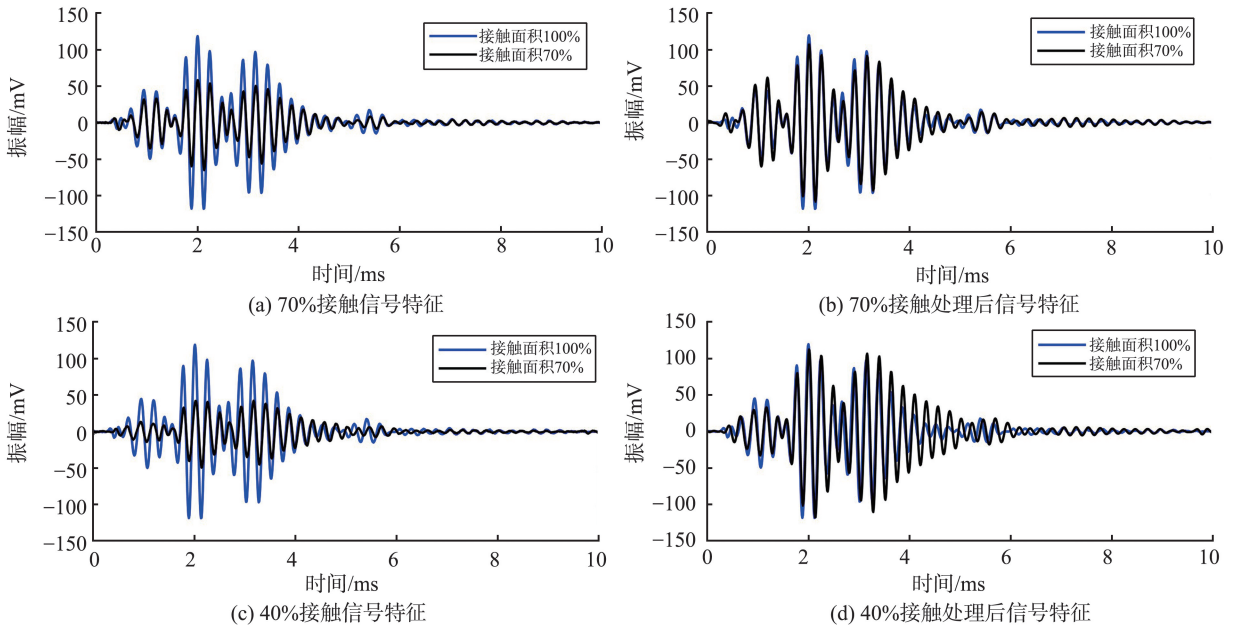


图10 不同接触面积的增益补偿效果试验

Fig.10 Gain compensation effect experiment of different contact area

2.2 经验模态分解与小波变换联合去噪方法

针对耦合噪声干扰问题,提出了一种结合经验模态分解与小波变换的联合去噪方法。其核心处理流程如下:首先,对包含反射信号的原始数据实施经验模态分解方法,从而得到多个含有噪声的不

其中 s 为复变量, $H(s)$ 描述的是滤波器对输入信号各个频率成分的作用; $H(e^{j\omega})$ 为滤波器在单位元上的频率响应; $H(j\omega)$ 为滤波器的传输函数,通过滤波器传输函数 $H(j\omega)$ 模长的求解,可以得出滤波器的增益特性; N 为滤波器阶数; ω_c 为滤波器的截止频率。本研究滤波器设置3个极点,截止频率范围为2 000~8 000 Hz,增益为0 dB。

在已知激发传感器和接收传感器接触面积情况下,可以计算出声波振幅衰减比例,以该衰减幅值作为滤波增益系数,通过对每道数据进行增益实现振幅的补偿。为测试巴特沃斯滤波的补偿效果,分别对接触面积为70%和40%时采集的声波信号进行处理。分析结果如下:(1)完整接触和70%面积接触的声波数据如图10(a)所示,当接触面积降低为70%时振幅降低,通过巴特沃斯滤波处理后,信号振幅如图10(b)所示,弱振幅信号得以增强,与全接触时的振幅特征基本一致,信号得到较好的补偿;(2)完整接触与40%面积接触的声波数据如图10(c)所示,接触面积降低为40%时信号强度降低尤为明显,通过巴特沃斯滤波后信号如图10(d)所示,弱信号的振幅得到较好的补偿,与全接触条件面积基本吻合。上述测试了本研究滤波方法对因接触面积不全所导致的振幅衰减具有较好的补偿能力和适应性。

同形态子波。其次,将分解生成的各模态分量与震源子波输入同步挤压小波变换^[29-30]进行互相关分析,通过计算两者间的互相关系数来量化其相似性。基于该相关性的强弱,可有效识别并剔除非震源信号成分。需特别指出,同步挤压小波变换综合了小波变

换与谱重排法的优势,它在小波变换的基础上,通过对小波系数谱中各元素的模值沿尺度轴进行压缩重排,进而提升了子波分辨能力。最后,依据互相关分析结果,筛选出相关性较高的模态分量进行叠加,从而有效滤除耦合噪声。具体流程如下。

(1)对单道声波信号实行完全自适应的噪声集合EMD(empirical mode decomposition)处理,最终可得到各阶模态分量以及对应的余项。每道信号经分解后产生的一系列分量与余项^[31]可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \overline{imf_n} + R_n, \quad (4)$$

式中, $x(t)$ 为原始信号, $\overline{imf_n}$ 为第 n 阶模态分量, R_n 为余项。

(2)从时频域角度,对每个模态分量与震源子波,应用基于同步挤压小波变换的互相关算法进行处理。通过时频反变换,可将互相关运算获得的时频相关系数还原为对应的模态分量。利用同步挤压小波变换,其时频相关系数及相应的反变换过程计算式^[31]为

$$P_{SD}(\omega_1, \tau) = \int_{\omega_1} \int_b T_D(\omega_1, b) T_s(\omega_1, b - \tau) d\omega_1 db$$

$$P(t) = \text{Re} [C_{\varphi}^{-1} \sum_i P_{SD}(a, \tau) (\Delta\omega)], \quad (5)$$

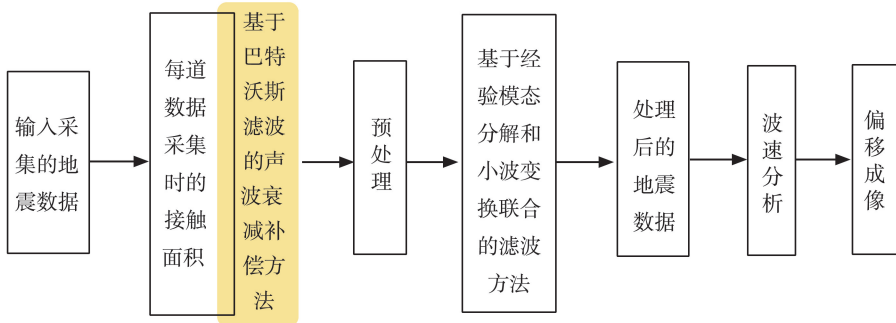


图11 隧道声波探测隧道衰减与噪声压制数据处理流程

Fig.11 Tunnel acoustic detection tunnel attenuation and noise suppression data processing flow

(1)振幅补偿:根据每道数据采集时的接触面积,采用基于巴特沃斯滤波构建的振幅衰减补偿方法对信号开展增强处理。通过这种处理手段,最终获取与完整接触状态下采集的地震数据具有同等效应的处理结果。

(2)预处理:采用切除直达波以剔除干扰、带通滤波筛选特定频率范围信号、道间能量均衡平衡各道能量差异、自动增益控制调节信号整体增益等方法进行预处理^[34]。

(3)噪声去除:采用经验模态分解与小波变换的联合方法对每道数据开展处理,获取分解后的各阶模态。通过选取恰当阈值,筛选出与震源子波相

式中, P_{SD} 为模态分量与震源子波之间的时频相关结果, T_D 为同步挤压小波变换后的时频系数,参数 a 和 b 分别为小波变换的尺度参数和时间参数,变量 τ 为时频域分析中的时间偏移量, $P(t)$ 为重构后的时域信号, Re 为求实运算, C_{φ} 为小波函数共轭的傅里叶变换, ω_1 为任一中心频率,同步挤压小波变换,会将 ω_1 附近区间的能量值挤压到 ω_1 上。

(3)计算相关后的模态分量与震源信号的互相关,计算公式^[32-33]为

$$R_{s,x_i}(t) = E [s(t) x_i(t+\tau)], \quad (6)$$

式中, $R_{s,x}$ 为震源信号 s 和某个信号 x 的互相关函数, E 为期望运算。

再计算震源信号的自相关,进而计算相关系数,计算公式为

$$R_s^-(t) = E [s(t) s(t+\tau)], \quad (7)$$

式中, R_s^- 为震源信号 $s(t)$ 的自相关函数。

(4)选取相关系数较大的各模态分量进行叠加,得到处理后的声波信号。

2.3 基于噪声压制与衰减补偿的隧道声波探测数据处理流程

基于上述振幅补偿与噪声去除方法,本研究形成了隧道开挖复杂环境下声波探测数据处理流程,如图11所示。

关性较强的模态分量,经叠加处理重构出最终的地震数据集。

(4)偏移成像:采用三维绕射叠加成像方法,对前期信号处理后获取的有效波场数据进行深度运算,通过精准叠加各绕射波场分量,构建出地下地质体精细的三维空间分布形态,为地质构造解析与资源勘探目标定位提供直观且高精度的成像成果。

3 典型不良地质体探测试验

3.1 含断层地质模型的隧道声波探测试验

为验证上述方法的噪声压制效果,构建典型不

良地质数值模型开展模拟试验,在模拟生成的地震记录中引入高强度高斯白噪声,通过对比处理前后的结果,验证了基于EMD和小波变换联合的噪声压制方法的有效性。首先构建含断层的三维正演模型用于仿真验证,如图12(a)所示。模型尺寸的大小为20 m×20 m×30 m,网格步长大小为0.05 m,并在隧道正演模型设置吸收边界。模型参数设定如下:岩石介质波速为3 000 m/s,隧道空腔波速为340 m/s,断层区域波速为2 000 m/s,采样间隔为 5×10^{-6} s,总采样时长为0.02 s^[35]。直达波切除后的单炮地震记录如图12(b)所示,图中 S_1 为断层模

型前界面反射波,其地震记录未呈现出清晰的同相轴,推测原因是断层前界面距刀盘较近,导致反射信号到时相差较大,而距离刀盘较远的断层后界面的反射波信号 S_2 到时基本一致。在实际工程条件下,所测得的最低信噪比为-12 dB,为了进一步验证方法的合理性,对直达波切除后的地震记录,分别添加信噪比 R_{SN} (signal-to-noise ratio)为-5、-10、-15和-20 dB的高斯白噪声。采用本研究提出的EDM和小波变换联合的方法处理含噪地震记录,并计算各模态分量与震源子波的互相关系数,将相关系数高的分量判定为有效信号成分。

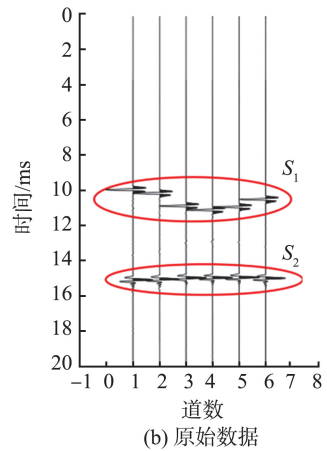
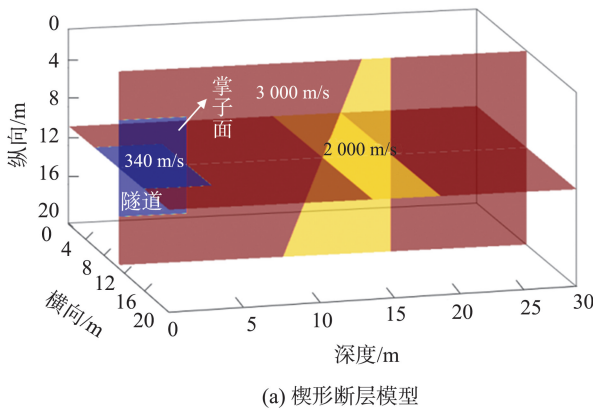
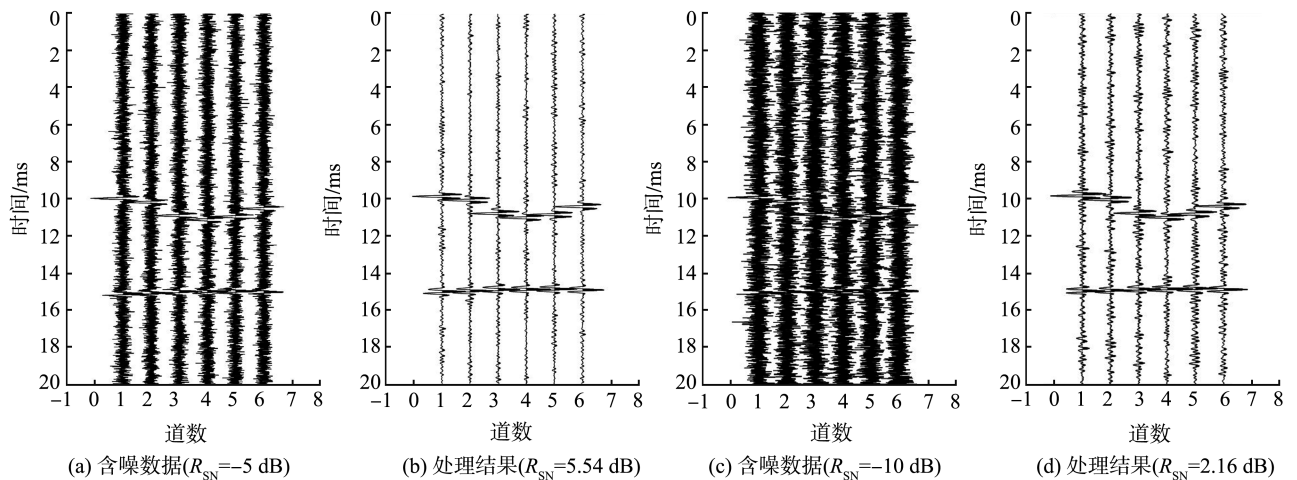


图12 隧道楔形断层模型
Fig.12 Tunnel fault model

为清晰呈现该方法的噪声压制效果,展示不同信噪比(R_{SN})条件下,该方法处理前后地震记录的信噪比变化情况,如图13所示。具体数据如下:信噪比 R_{SN} 为-5 dB时,采用该方法后,地震记录中的噪声被有效压制,处理后的信号 R_{SN} 提升至5.54 dB; R_{SN} 为-10 dB时,处理后的信号 R_{SN} 提升至2.16 dB; R_{SN} 为-15 dB时,处理后的信号 R_{SN} 提升至-1.64 dB; R_{SN} 为-20 dB时,处理后

的信号 R_{SN} 提升至-5.32 dB,由于噪声信号太强,反射信号难以识别。上述试验结果充分表明,该方法在噪声压制方面具备良好的能力。进一步分析数据可得知,当原始信号的 R_{SN} 高于-15 dB时,经该方法处理后的信号 R_{SN} 明显改善,去噪效果较好。这一结果能够为后续的成像处理和地质解译提供良好的数据支撑。断层模型的成像结果如图14所示。



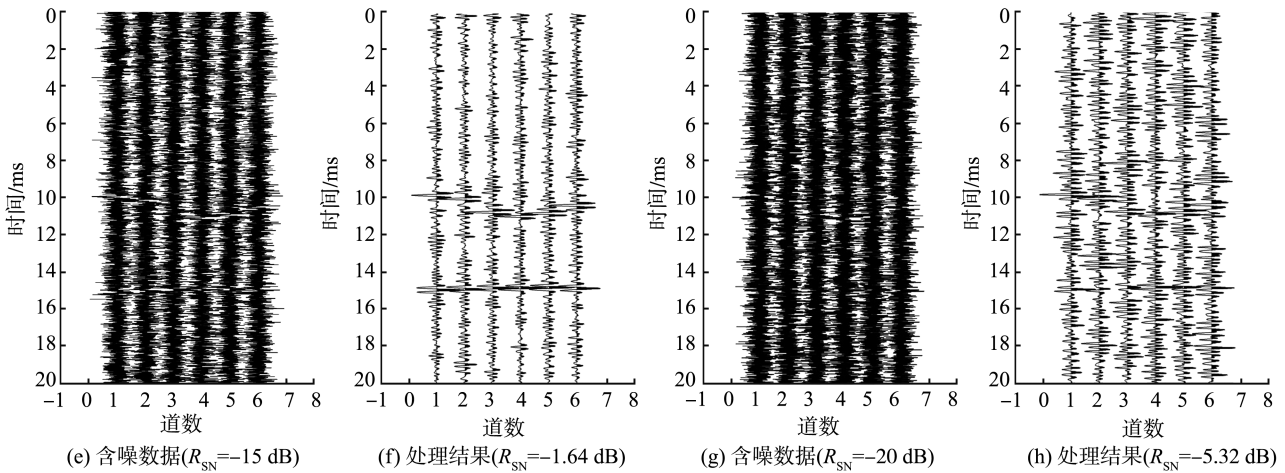


图13 含强噪声数据处理结果对比
Fig.13 Comparison of data processing results with strong noise

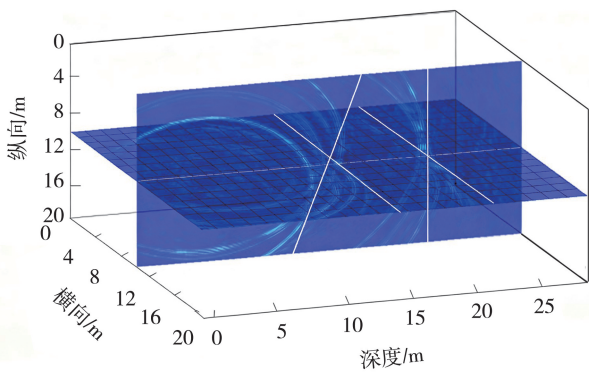
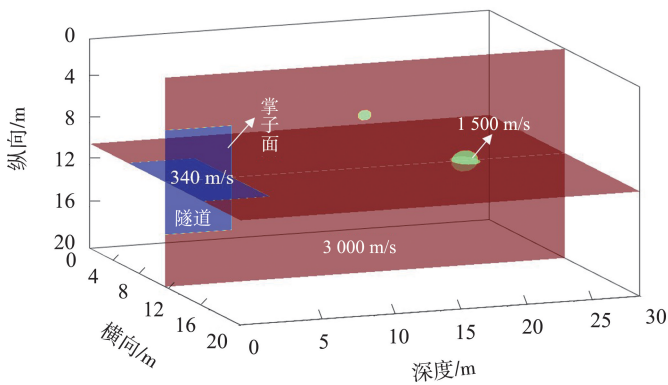


图14 隧道楔形断层模型成像结果
Fig.14 Tunnel wedge fault model imaging results

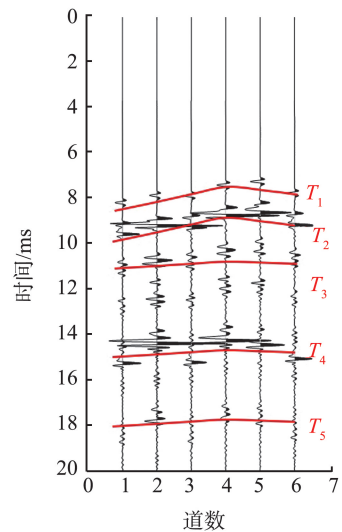
3.2 含溶洞地质模型的隧道声波探测试验

含溶洞构造的三维正演模型如图15(a)所示,该模型在隧道尺寸、直径、网格划分、吸收边界条件、时间采样间隔及采样时长等参数设置上,均与

前述断层模型保持一致。模型中各区域波速设定如下:岩石介质波速为3 000 m/s,隧道空腔波速为340 m/s,溶洞波速为1 500 m/s^[35]。溶洞设置两个,靠近掌子面较近的溶洞直径为0.5 m,距离掌子面较远的溶洞直径为1.0 m。正演模拟后,通过切除直达波获得的一炮地震记录如图15(b)所示。图15(b)中清晰地用红线标识了对应于不同反射界面的位置: T_1 对应近端溶洞前界面的反射波, T_2 对应近端溶洞后界面的反射波, T_3 对应远端溶洞前界面的反射波, T_4 对应远端溶洞后界面的反射信号,而 T_5 则表示多次波反射。随后,分别在去除直达波的地震记录上添加了 R_{SN} 为-5、-10、-15和-20 dB的随机噪声,试验结果表明,当信噪比低于-15 dB时,目标反射信号基本被噪声淹没,难以进行有效识别。



(a) 溶洞模型



(b) 原始数据

图15 隧道溶洞模型
Fig.15 Tunnel cavern model

为直观验证基于经验模态分解和小波变换联合方法对含噪地震记录的去噪性能,针对添加不同信噪比的地震记录,展示了该联合方法的具体处理结果,如图16所示。各信噪比下的噪声压制效果、反射波信号清晰度及处理后信噪比变化如下:添加信噪比 R_{SN} 为-5 dB时,地震记录中的噪声得到较好的压制和去除,前界面反射波 T_1 和 T_3 能够看到较弱的反射信号,后界面反射波 T_2 和 T_4 较为清晰,处理后地震道信噪比 R_{SN} 为6.25 dB;添加信噪比 R_{SN} 为-10 dB时,溶洞前界面反射波 T_3 能够看到较弱

的反射信号,后界面反射波 T_2 和 T_4 较为清晰,处理后地震道信噪比 R_{SN} 为2.43 dB;添加信噪比 R_{SN} 为-15 dB时,溶洞前界面的反射信号难以识别,但溶洞后界面反射波 T_2 和 T_4 仍较为清晰,此时处理后地震道的 R_{SN} 为-1.87 dB;添加信噪比 R_{SN} 为20 dB时,处理后地震道信噪比 R_{SN} 为-6.56 dB,由于噪声信号太强,反射信号难以识别。由上述分析可知,当信噪比大于-5 dB时,该方法能够有效压制噪声,提高信噪比,取得较理想的去噪效果。溶洞模型的成像结果图如图17所示。

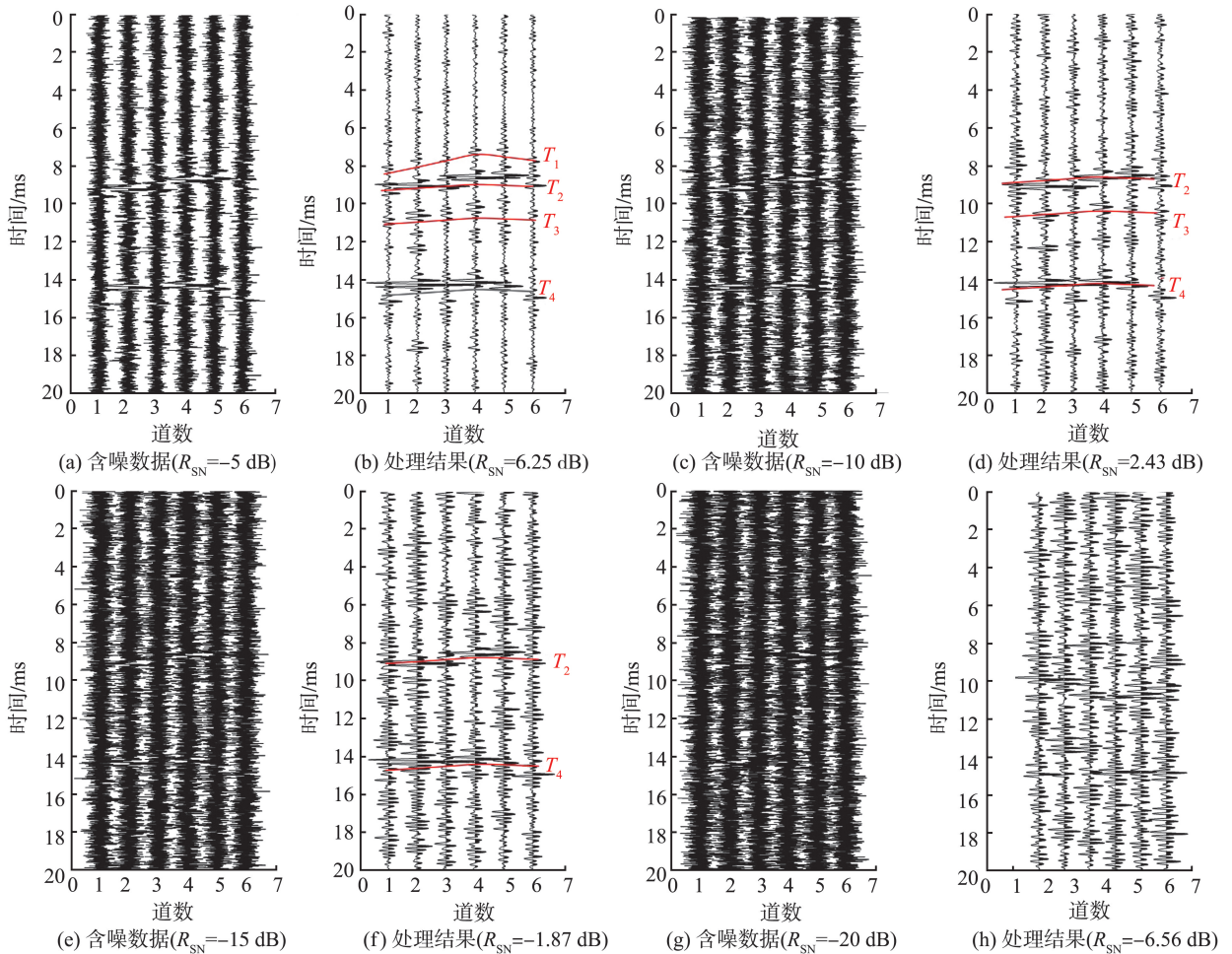


图16 含强噪声数据处理结果对比
Fig.16 Comparison of data processing results with strong noise

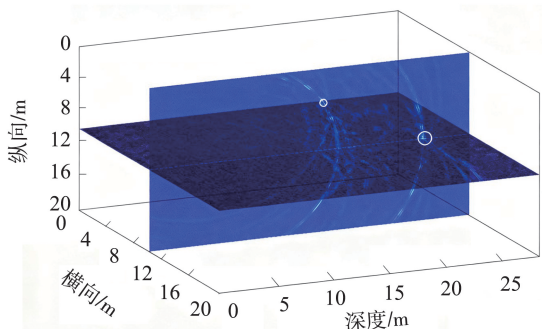
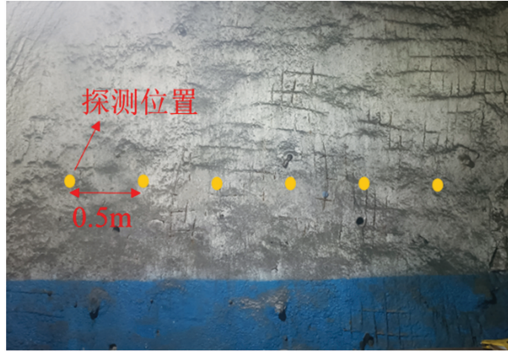
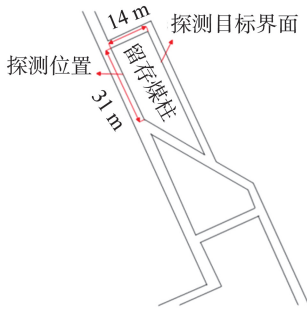


图17 隧道溶洞模型成像结果
Fig.17 Imaging results of tunnel karst cave model

4 工程试验与验证

本次工程试验位于鄂庄煤矿-300 m水平井底车场,如图18所示,具体选择留存煤柱长边为探测区域,旨在探明距当前位置14 m的巷道界面情况,探测测线布设于巷道侧墙,距离底板高度1.5 m,其中偏移距和道间距均设定为0.5 m,共设计6个激发点,采用单炮激发、其余点位同步接收的观测方式。



(a) 巷道部分平面示意图

(b) 观测系统

图 18 煤矿巷道现场情况

Fig.18 Field situation of coal mine roadway

本研究聚焦声波传感器与硅橡胶耦合场景下的数据采集与分析。在数据处理环节,其中第一炮地震数据如图 19(a)所示,先经过基于巴特沃斯滤波的声波传递振幅衰减补偿方法,完成预处理操作。经处理后,图中直达波的同相轴清晰可见,依据其初至时间计算得到的介质波速约为 1 800 m/s。进一步采用 EMD 与小波变换联合方法,对各 IMF (intrinsic mode function) 模态分量进行处理,并计算

不同 IMF 分量与震源信号的相关系数,选取相应阈值进行模态叠加,最终得到图 19(b)所示的处理后地震记录。由于探测距离远大于激发与接收传感器间的距离,使得反射信号到达各声波传感器的时间差较小,从图 19(b)中可见噪声信号得到有效压制,反射信号被成功提取。鄂庄煤矿-300 m 水平井底车场位置水平巷道内进留存煤柱长边的反演成像结果如图 20 所示。

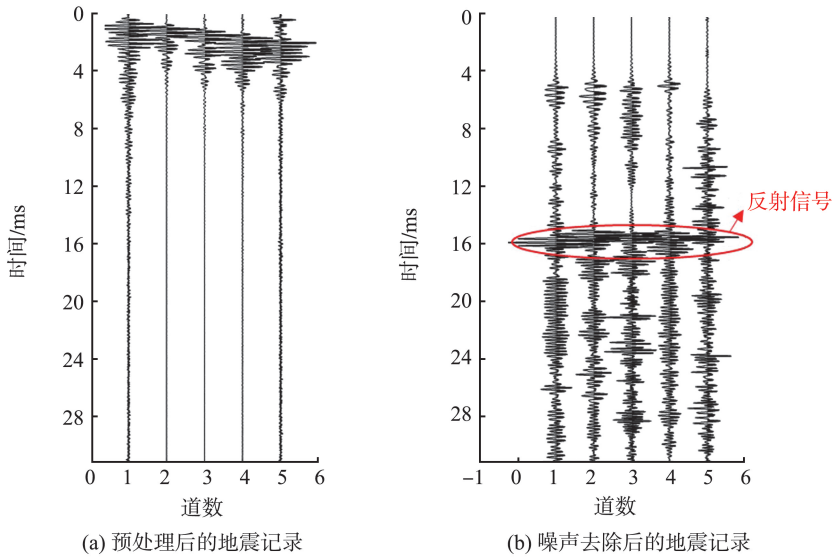


图 19 鄂庄煤矿-300 m 水平井底车场探测数据分析

Fig.19 Analysis of detection data of -300 m horizontal shaft bottom yard in Ezhuang Coal Mine

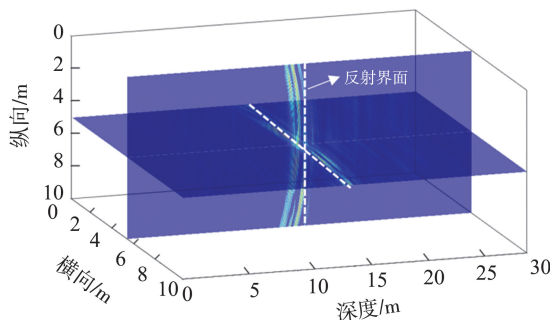


图 20 鄂庄煤矿-300 m 水平井底车场探测成像结果

Fig.20 The detection imaging results of -300 m horizontal shaft bottom parking lot in Ezhuang Coal Mine

5 结论

本研究针对隧道施工不良地质超前预报开展研究,重点研究了岩体开挖非平整表面和隧道强干扰环境下声波探测信号补偿与去噪方法,形成了基于声波衰减补偿与去噪的隧道施工不良地质探测方法。研究方法和技术在数值试验、物理模型试验、现场实测等均取得了较好验证,为隧道不良地质高分辨探测与成像提供了技术支撑。具体结论如下。

(1)针对开挖非平整岩面声波采集,基于数值仿真与物理模型试验揭示了岩面-传感器耦合面积与声波振幅之间的变化特征,揭示了耦合材料厚度、硬度、声阻抗等参数对声波能量传输的影响规律,优选了以硅橡胶为代表的材料厚度等参数,为获取高质量声波信号提供了支撑。

(2)针对传感器非全耦合接触导致的接收信号振幅衰减现象,本研究通过系统的物理模型试验揭示了其声波能量衰减规律,并基于该试验特征,提出了基于巴特沃斯滤波的声波传递振幅衰减补偿方法,实现了对不同接触面积情况下接收信号幅值的补偿;在此基础上,针对隧道强耦合噪声干扰,提出了基于EMD和小波变换联合的去噪方法,实现了噪声的压制和有效信号的分离提取。

(3)以上述成果为支撑,形成了基于声波衰减补偿与去噪的隧道施工不良地质探测实现方法。成功应用于济南鄂庄煤矿巷道探测,现场应用效果表明可实现信号的有效恢复和提取,探明了巷道侧边的临近空腔等,为不良地质探测提供了方法支撑。

下一步针对不良地质高分辨探测的需求,进一步研究多阵列声波传感器组合的精细探测方法,融合大数据挖掘与智能反演方法,提升目标区地质探测的准确性。同时,针对岩体强度、地应力等关键力学参数,研究岩体属性评价方法,为灾害源判识提供更多参数,也将是下一步的重点研究方向。

参考文献:

[1] 王福文,梁帅文,冯爱军. 2024年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(2): 425-434.

WANG Fuwen, LIANG Shuaiwen, FENG Aijun. Statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2024 [J]. Tunnel Construction, 2025, 45(2): 425-434.

[2] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.

HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.

[3] 崔玖江. 盾构隧道施工风险与规避对策[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 377-396.

CUI Jiujiang. Risks and countermeasures for construction of shield-bored tunnels [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 377-396.

[4] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.

QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.

[5] QIAN Qihu. Present situation and future prospect of application of tunneling machine to Chinese underground engineering construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2071-2080.

[6] CHEN X S, SHEN J, BAO X H, et al. A review of seismic resilience of shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 136: 105075.

[7] 曹创华,康方平,魏方辉,等. 高密度电阻率法逐级反演与实践——以湖南省常德市鼎城区某地质剖面为例 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2398-2405.

CAO Chuanghua, KANG Fangping, WEI Fanghui, et al. Exploration and practice of step-by-step inversion of high-density resistivity method: taking a geological section of Changde Dingcheng development zone as an example [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2398-2405.

[8] 黄俐,梁鹏. 北京地铁六号线盾构施工风险分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(6): 238-243.

HUANG Li, LIANG Peng. Risk analysis in Beijing subway shield tunneling construction of line 6 [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(6): 238-243.

[9] 徐海清,陈亮,周少东,等. 城市地铁岩溶穿越区塌陷机理及处治技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 282-287.

XU Haiqing, CHEN Liang, ZHOU Shaodong, et al. Collapse mechanism and treatment technology of the Karst regions in city metro [J]. Science Technology and

- Engineering, 2017, 17(8): 282-287.
- [10] RICHARDSON M D, BRIGGS K B. In situ and laboratory geoacoustic measurements in soft mud and hard-packed sand sediments: implications for high-frequency acoustic propagation and scattering[J]. *Geo-Marine Letters*, 1996, 16(3): 196-203.
- [11] 鲜国, 石少帅, 赵勇, 等. 强富水隧道下穿河段突涌水灾害综合防控方法研究与应用[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(2): 74-82.
XIAN Guo, SHI Shaoshuai, ZHAO Yong, et al. Research and application of comprehensive prevention and control methods for water inrush disasters in high-water-pressure and water-rich tunnels underpassing river sections [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation in Tunnels and Underground Engineering*, 2019, 1(2): 74-82.
- [12] 邓铭江, 刘斌. 超特长隧道 TBM 集群施工超前地质预报的挑战、对策与发展方向[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(1): 8-19.
DENG Mingjiang, LIU Bin. Challenges, countermeasures and development directions of advanced geological prediction for TBM cluster construction in extra-long tunnels[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation in Tunnels and Underground Engineering*, 2019, 1(1): 8-19.
- [13] 陈立平, 方继伟, 干啸洪, 等. 隧道噪声传播扩散规律及其检测方案探讨[J]. *隧道建设*, 2016, 36(12): 1442-1448.
CHEN Liping, FANG Jiwei, GAN Xiaohong, et al. Discussion on propagation rules and detection schemes of noise in tunnels [J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(12): 1442-1448.
- [14] 张凤蛟, 韩立国, 董世学. 检波器尾锥与地表耦合阻尼研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006(增刊2): 96-100.
ZHANG Fengjiao, HAN Ligu, DONG Shixue. The research of the damping between the geophone spike and ground [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006(Suppl.2): 96-100.
- [15] TANG D L, RAO S, DING C, et al. Ultrasonic dry-coupling detection with gradient acoustic impedance match layer[J]. *Applied Acoustics*, 2025, 228: 110355.
- [16] 穆峰, 常发亮, 蒋沁宇. 基于改进 EMD 算法的信号滤波[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2015, 45(3): 35-42.
MU Feng, CHANG Faliang, JIANG Qinyu. Signal filtering based on improved empirical mode decomposition [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2015, 45(3): 35-42.
- [17] 李光林, 吕维雪. 小波分析与信号处理[J]. *山东大学学报(工学版)*, 1996(增刊1): 14-20.
LI Guanglin, LÜ Weixue. The wavelet transforms and the signal processings [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 1996 (Suppl. 1): 14-20.
- [18] 李炼然, 任周洪, 王斌, 等. 等值反磁通瞬变电磁数据的波场反变换方法及其在会泽铅锌矿区井下超前探测中的应用[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2025, 7(2): 51-63.
LI Lianran, REN Zhouhong, WANG Bin, et al. Inverse wavefield transform method for opposing coils transient electromagnetic data and its application in ahead prospecting in the lead-zinc mine at Huize [J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2025, 7(2): 51-63.
- [19] 李洪, 孙云莲. 基于 EMD 虚拟通道的 ICA 算法在信号消噪中的应用[J]. *北京邮电大学学报*, 2007(5): 33-36.
LI Hong, SUN Yunlian. Denoising by ICA based on EMD virtual channel [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2007(5): 33-36.
- [20] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [21] XU Y, LUO M Z, LI T, et al. ECG signal de-noising and baseline wander correction based on CEEMDAN and wavelet threshold [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2754.
- [22] 王瑞. 盾构隧道不良地质探测阵列声波稀疏观测与信号高分辨提取方法[D]. 济南: 山东大学, 2024: 10-20.
WANG Rui. Array acoustic sparse observation and signal high-resolution extraction method for adverse geological detection in shield tunnel [D]. Jinan: Shandong University, 2024: 10-20.
- [23] 杨继华, 闫长斌, 苗栋, 等. 双护盾 TBM 施工隧洞综合超前地质预报方法研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 27(2): 250-259.
YANG Jihua, YAN Changbin, MIAO Dong, et al. Comprehensive advanced geological prediction methods for tunnel construction with double shield TBM [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 27(2): 250-259.
- [24] HU M M, ZHANG B, LI B, et al. TBM-cutter rock-breaking effect and mechanism considering different cutting sequences [J]. *Bulletin of Engineering Geology*

- and the Environment, 2022, 81(3): 102.
- [25] 刘媛, 马祥华, 刘洋, 等. 干耦合超声波检测及波初至的自动拾取[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1455-1464.
LIU Yuan, MA Xianghua, LIU Yang, et al. Dry coupled ultrasonic testing technology and automatic picking method for determination of arrival times [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1455-1464.
- [26] 黄庆享, 张文忠, 侯志成. 固液耦合试验隔水层相似材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2813-2818.
HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong, HOU Zhicheng. Study of simulation materials of aquifuge for solid-liquid coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Suppl. 1): 2813-2818.
- [27] MANWAR R, SAINT-MARTIN L, AVANAKI K. Couplants in acoustic biosensing systems [J]. Chemosensors, 2022, 10(5): 181.
- [28] MAHATA S, HERENCAR N, KUBANEK D. Optimal approximation of fractional-order butterworth filter based on weighted sum of classical butterworth filters [J]. IEEE Access, 2021, 9: 81097-81114.
- [29] 张纯. 基于同步挤压小波变换地震时频属性与应用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 8-17.
ZHANG Chun. Seismic time-frequency attribute and application based on synchrosqueezing wavelet transform [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020: 8-17.
- [30] HERRERA R H, HAN J J, VAN DER BAAN M. Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis [J]. Geophysics, 2014, 79(3): V55-V64.
- [31] ZHANG S Q, LIU H T, HU M F, et al. An adaptive CEEMDAN thresholding denoising method optimized by nonlocal means algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6891-6903.
- [32] 陈晓君, 梁楠, 陈根龙, 等. 基于HHT方法的岩石钻进振动信号分析[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1258-1265.
CHEN Xiaojun, LIANG Nan, CHEN Genlong, et al. Analysis of rock drilling vibration signal based on the HHT method [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1258-1265.
- [33] LEI Y G, ZUO M J. Fault diagnosis of rotating machinery using an improved HHT based on EEMD and sensitive IMFs [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(12): 125701.
- [34] 刘斌, 李术才, 李建斌, 等. TBM掘进前方不良地质与岩体参数的综合获取方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(6): 105-112.
LIU Bin, LI Shucui, LI Jianbin, et al. Integrated acquisition method of adverse geology and rock properties ahead of tunnel face in TBM construction tunnel [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(6): 105-112.
- [35] 王建森. 基于解耦弹性波动方程的隧道最小二乘逆时偏移成像方法 [D]. 济南: 山东大学, 2021: 66-82.
WANG Jiansen. Tunnel least squares reverse time migration imaging method based on decoupled elastic wave equation [D]. Jinan: Shandong University, 2021: 66-82.

(编辑: 宋艳)