

隧道盾构超前探中地震波时距特征与波场模拟分析

寇雁菲¹, 陈三明^{2*}, 何嘉鸣¹, 李俊³

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²桂林航天工业学院计算机科学与工程学院, 广西 桂林

³中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年1月15日; 录用日期: 2024年2月20日; 发布日期: 2024年2月28日

摘要

地铁已成为当今最关键的交通工具之一, 不仅快速而且很便捷。挖掘隧道是至关重要的一环, 而盾构技术在此过程中扮演着核心角色。通过盾构机TBM (Tunnel Boring Machine)与超前地质探测技术的结合, 我们能够有效预测并分析隧道前方的地质条件, 这大大提升了施工的安全性。地震波的传播和采集系统在地质探测中十分重要, 通过分析不同类型地震波的传播时间和路径, 我们能更准确地理解地层结构。与传统的观测系统不同, 本次使用的是环状观测系统, 其中检波器和可控震源均位于同一圆面上, 这一新布局为研究时距曲线带来了新的视角和更深的意义。鉴于可用于盾构施工的超前探测方法较少, 本研究通过数学分析法计算时距曲线, 并建立二维隧道模型, 使用有限差分法模拟隧道内的地震波场, 旨在研究地震波在各种地质异常条件下的响应特征, 以期为隧道施工提供更高的安全保障。

关键词

地震勘探, 盾构, 超前探测, 时距曲线, 波场模拟

Seismic Time-Interval Characteristics and Wave Field Simulation Analysis in Tunnel Shield Advance Exploration

Yanfei Kou¹, Sanming Chen^{2*}, Jiaming He¹, Jun Li³

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²School of Computer Science and Engineering, Guilin Institute of Aerospace Industry, Guilin Guangxi

³China Municipal Engineering Zhongnan Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 寇雁菲, 陈三明, 何嘉鸣, 李俊. 隧道盾构超前探中地震波时距特征与波场模拟分析[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(2): 186-198. DOI: 10.12677/ag.2024.142018

Abstract

Subway has become one of the most critical means of transportation today, not only fast but also very convenient. Tunneling is a crucial part, and shield technology plays a central role in this process. By combining the Tunnel Boring Machine (TBM) with advanced geological detection technology, we can effectively predict and analyze the geological conditions ahead of the tunnel, which greatly improves the safety of construction. Seismic wave propagation and acquisition systems are very important in geological exploration. By analyzing the propagation time and path of different types of seismic waves, we can understand the formation structure more accurately. Different from the traditional observation system, the annular observation system is used, in which the geophone and the vibroseis are located on the same circular plane. This new layout brings a new perspective and deeper significance to the study of the time interval curve. In view of the few advanced detection methods available for shield construction, this study calculated the time interval curve through mathematical analysis, established a two-dimensional tunnel model, and used the finite difference method to simulate the seismic wave field in the tunnel, aiming to study the response characteristics of seismic waves under various geological abnormal conditions, in order to provide higher security for tunnel construction.

Keywords

Seismic Exploration, Ashield, Advance Detection, Time Interval Curve, Wave Field Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国隧道建设规模的扩大，隧道工程数量和长度不断增加，复杂结构和艰难施工成为常态。恶劣地质条件如河流、洞孔、断裂带等，常导致严重损害，增加滑坡、石块坍塌等事故风险。此外，不明确的地下情况和障碍物使得隧道掘进困难。因此，地质监测和灾害预报成为工程和科研的重点[1]。结合机械、计算机、地质等多学科，研究地质勘查与灾害预测的科学理论和方法，开发先进探测技术和设备，对于确保国家地下工程安全、提升工程质量至关重要。

在隧道建设前的地质勘查阶段，由于技术、时间和预算的限制，勘查活动只能局限于有限的钻探。这导致了对钻孔间地质情况的推断必须依赖地质测量和物理探测等方法，从而不可避免地产生一些盲区和误差，难以完全符合施工需求。因此，在隧道建设过程中，进行超前地质预报变得尤为重要。通过这种预测，能够及时识别隧道前方可能出现的异常状况，准确把握不稳定地质结构的特性，并事先准备好相应的施工方案，以此确保整个隧道施工的安全性[2] [3]。

盾构施工技术在中国城市地铁建设中广泛应用。由于其设备和过程的复杂性，施工中可能遇到如孤石、断层等复杂地质条件，未经提前探测可能导致隧道开裂、塌方等地质灾害[4]。因此，地质超前探测对保证施工顺利、工程质量、进度和机械安全至关重要，目前迫切需要在 TBM (隧道掘进机) 施工环境中实施先进的探测技术[5]。许多物理探测方法，如地震波、声波和电磁波技术，已被用于构建 TBM 施工

环境的地质探测。在过去十年里, 针对隧道超前地质预报问题, 国内较多的学者和工程技术人员开展了相关问题的研究, 姜大鹏[6]等人将地质雷达法和地质速测法结合起来, 形成了一种新的超前地质预报方法, 实现了施工现场的超前预报, 及时改变施工方法和支护方案; 刘阳飞等[7]针对 TSP 超前地质预报系统存在的漏报、错报及数据采集过程中的各种干扰问题, 研究了避免或降低各种干扰可采取的应对措施。肖宽怀[8]在 TSP 技术的基础上, 改进了观测系统布置、数据采集及资料处理方法, 扩大了其适用范围, 提高了预报精度。一些商业上可集成于 TBM 的超前探测技术已经在工程项目中得到应用, 并取得了初步成效[9] [10]。然而, 实施这些技术和相关基础研究的详细信息极其有限, 且仍存在未解决的问题。由于 TBM 占据了隧道掌子面后的大部分空间, 其内部大量的金属部件和电源线会干扰电磁场, 这使得大多数先进探测技术难以在 TBM 隧道中使用[11] [12]。

作为一种在我国隧道和高速公路建设中广泛应用并取得显著成功的超前探测技术, 反射地震波法拥有独特的优势, 如高精度和深远的探测能力[13]。因此, 在物探工作中, 通常优先采用反射波超前探测法。本研究结合了反射波超前探测技术和盾构机的应用, 研究和验证了适合盾构施工环境的设备配置模式, 使观测系统能较好地完成数据收集和处理工作, 通过在盾构掘进机前端进行探测, 有效地提前发现障碍物和预测不良地质状况。这种方法能够为施工单位提供及时的警示, 使其能够采取有效措施以确保施工安全。

2. 研究方法

2.1. 盾构地震波超前探时距特征

研究主要从几何地震学的角度研究隧道地震波法超前探测观测系统中不同倾斜界面的直达波和反射波时距曲线特征。时距曲线简单地描述了炮点到检波点的行进时间和地震波探测距离的关系曲线。但是本观测系统与以往观测系统都不同, 之前都是直线型观测系统, 而本观测系统则是圆形观测系统, 震源与检波器放置在一个圆面上。所以, 本研究所做的时距曲线图则是时间与圆心角的关系曲线, 如图 1。

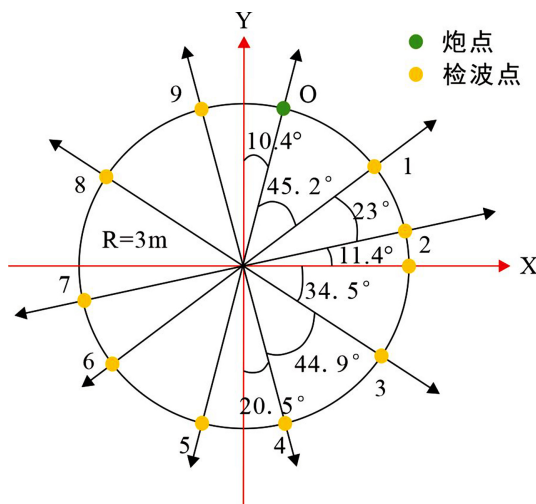


Figure 1. Observation system diagram
图 1. 观测系统图

1) 直达波时距曲线公式如下:

$$t = \frac{L}{V} = \frac{\alpha * R}{V} \quad (1)$$

其中, α 为圆心角, R 为圆的半径 3 m, V 为直达波的速度, L 为弧长。用斜率 $m = \frac{R}{V}$ 可以求得介质的传播速度。

2) 反射波时距曲线公式如下:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{\sqrt{4h^2 + 4R^2 (\sin \beta/2)^2}}{v} \quad (2)$$

X 是地震波传播距离, R 为盾构机半径, v 是传播速度, h 为炮点到垂直界面的距离。

2.2. 盾构地震波超前探正演数值模拟

由于受限于隧道空间条件, 无法布置传统的观测系统, 因此在符合当前的硬件条件下, 设计了一种环形的震源与检波器布置观测系统, 采用少炮多检波器的原理, 采用有限差分的方法对隧道中存在的孤石、溶洞及岩层界面地质现象进行二维数值模拟。先建立地质模型和观测系统, 设定模型详细参数, 再进行数值计算, 对地质模型进行数值模拟, 得到地震波对各类地质异常体的响应特征, 最后对正演结果进行分析, 得出结论。

地震波数值模拟技术就是基于波动理论, 使用有限差分的方法去解所知的波动方程。该方法需要先对空间位置和时间等变量作离散化处理, 对于 $f(x)$ 这样的单变量函数, 在采样点 $x = \Delta x$ 处的值为 $f(\Delta x)$, Δx 为步长。则 $f(x)$ 在 x 点处的导数:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \sum_{m=-N}^N a_n f(x+m\Delta x) \quad (3)$$

N 是差分格式的长度, a_n 是系数, 二者共同决定了差分的格式。

3. 结果与分析

3.1. 时距特征分析

3.1.1. 垂直界面地震波时距特征分析

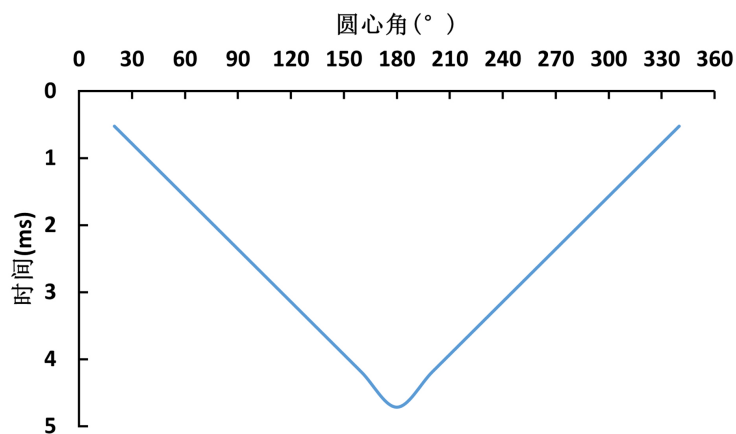


Figure 2. Time distance curve of direct wave

图 2. 直达波时距曲线

图 2 为地震波速度 V 为 2000 m/s 时的时距曲线, 横坐标为圆心角, 纵坐标为时间, 此时的时距曲线中的距离相当于是角度, 所以, 时距曲线图与以往的也不一样, 这是一条类似抛物线的曲线, 由于观测

系统是圆形的，检波器对称放置，所以曲线图也是对称分布的。

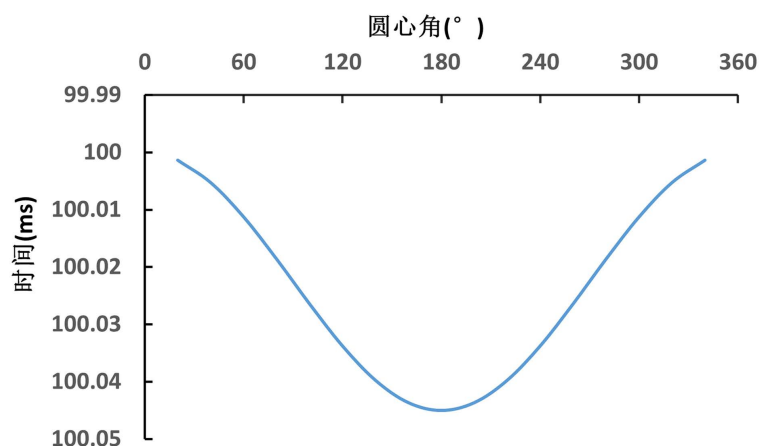


Figure 3. Time distance curve of reflected wave at vertical interface
图 3. 反射波时距曲线图

由图 3 可以看出，当反射面是垂直界面时，反射波时距曲线仍是一条类似抛物线的曲线，曲线关于圆心角呈两侧对称的形式，当圆心角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的范围时，时间 t 随着圆心角 α 的增大而变长，当圆心角在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的范围时，时间 t 随着圆心角 α 的增大而变短，在 180° 的时候，旅行时间最长。这也说明检波器距离震源的位置越近，旅行时间越短，检波器距离震源的位置越远，旅行时间越长，又因为是一个环形观测系统，检波器是对称放置的，所以反射波时距曲线图呈现一条对称的类双曲线图。

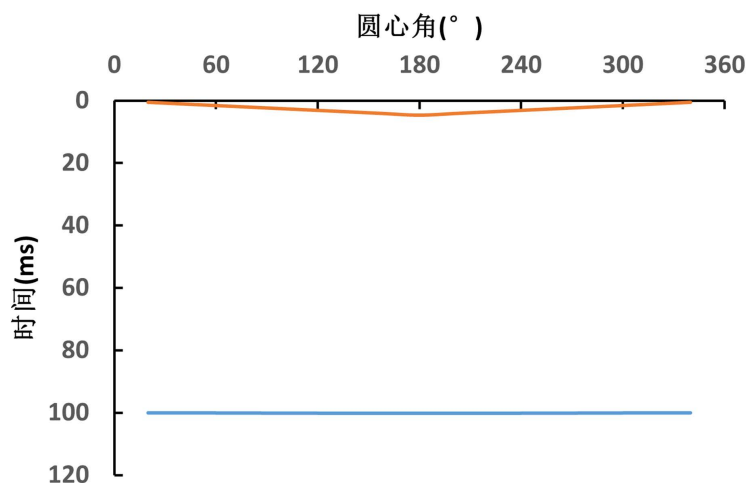


Figure 4. Time distance curve comparison between direct wave and reflected wave at vertical interface
图 4. 直达波与反射波时距曲线对比

图 4 可以看出，在 h 相同，为 100 m ； V 相同，为 2000 m/s 时，直达波旅行时间比反射波旅行时间短，由于直达波未经过反射而是直接从震源到达检波器的，所以检波器先接收到直达波，再接收到反射波。

3.1.2. 倾斜界面地震波时距特征分析

倾斜界面的角度也对时距曲线产生影响，本研究以地震波速度为 2000 m/s 时为例，探究不同倾斜界

面时时距曲线图，从而分析得到不同倾角的反射界面对时距曲线的影响。

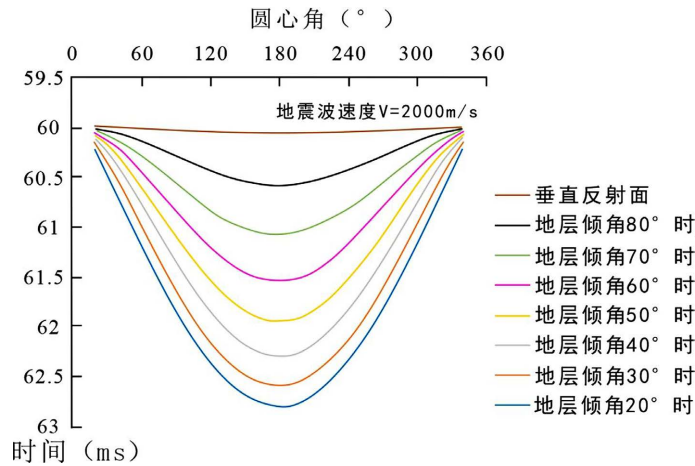


Figure 5. Time distance curve of reflection wave at different inclined interfaces when seismic wave velocity is 2000 m/s

图 5. 地震波速度为 2000 m/s 时不同倾斜界面反射波时距曲线

当 $h = 60 \text{ m}$ ，地震波速度为 2000 m/s 时的时距曲线图形如图 5 所示。可以看出，当地震波速度一定时，不同倾斜界面的时距曲线差异很明显，地层倾角越大，旅行时间越短，所以在数据处理时能够轻易的将不同倾斜界面的时距曲线区分开。随着地震波速度的增大，时距曲线向下凹的程度也越来越深，时距曲线的极小点都是相同的，随着反射界面的倾角逐渐变大，时距曲线所表现出的曲率在逐渐减小，随着反射界面的倾角逐渐变大，时距曲线所表现出的曲率在逐渐减小。

3.1.3. 盾构超前探测理论模型分析

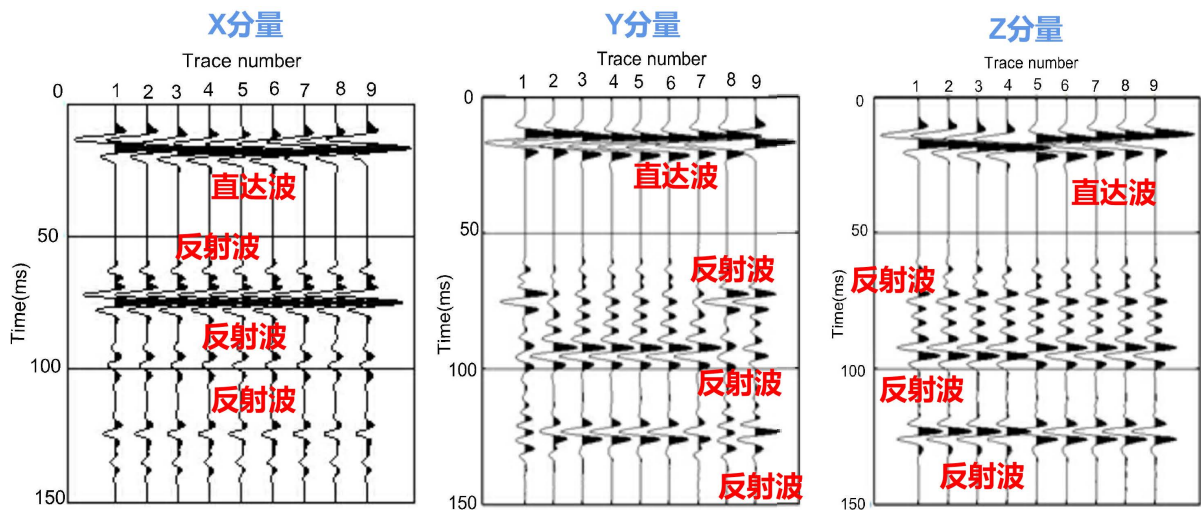


Figure 6. Seismic record

图 6. 地震记录

如图 6 所示，是通过地震正演模拟获得的地震记录，从左至右分别为 X、Y、Z 三个分量的数据，横坐标表示记录道编号，纵坐标表示时间，可以看出，X 分量、Y 分量、Z 分量中都可以观测到直达波和反射波，因为直达波的传播未经过反射界面，而是直接从震源传到检波器的，所以直达波的信号是最强

的,而且也是呈一条直线,根据反射波的同相轴显示,可以看出这是三个分界面的数据,所以 X 分量、Y 分量、Z 分量中都能搜集到三个分界面的反射波信息,由地震记录可以看出来,三个分量中收集到的反射波信息差异比较大,由于检波器之间的距离太近,地震反射波同相轴近似表现为直线特征,这与前面研究的理论时距特征相吻合。

3.2. 孤石地质异常体的地震波场模拟研究

为了建立合理的孤石模型及设定合理的模型参数,参考了宗成兵[14]在“花岗岩地层地铁隧道盾构孤石探测及处置新方法”的实测数据和曹权[15]的“深圳地区花岗岩球状风化体地下分布规律统计分析”的实测统计数据,依据深圳实际工程建立孤石模型及波场快照。下面对其在深圳地铁 7 号地铁线路的实际测量数据进行阐述,深圳地铁的 7 号线从桃园站开始设计,沿东方的龙珠路,经过八路和北环龙珠环在深云交汇处设计。在地铁上方第四纪人工覆盖层,浸蚀沉积物,残留沉积物,下伏燕山期花岗岩,花岗岩和岩石的风化作用的阶段的区域中,各种风化现象很普遍,满足孤石发育的地质条件。

在深圳地区共调查了 216 个地点,在 90 个地点发现了石头,并收集了 854 个有关单个石头分布的详细数据。得出以下统计图,如图 7 所示。

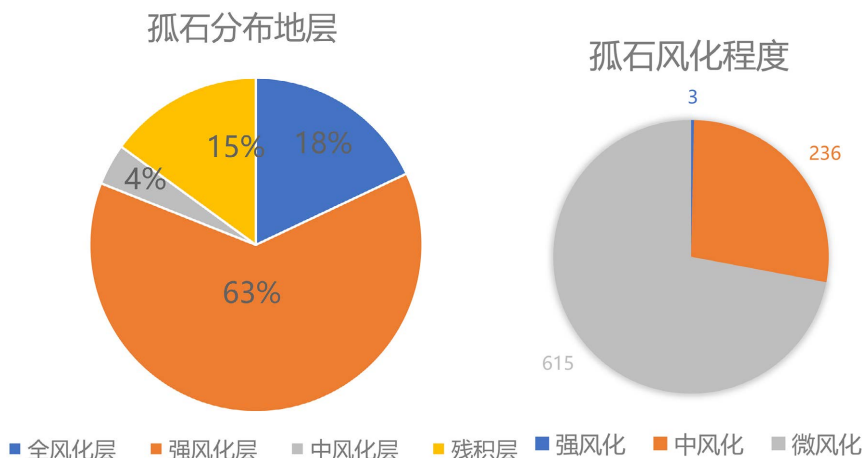


Figure 7. Weathering statistics for orphan rocks and stratigraphic statistics of orphan rock distribution

图 7. 孤石风化程度统计和孤石分布地层统计

3.2.1. 纵列孤石模型分析

球形风化核是花岗岩风化土中常见的“孤石”,是一种由石英矿物组成的不易风化的角砾质残余核(球形风化核)。孤石地质异常是地铁盾构施工的一个危险因素,孤石在盾构施工中遇到未被发现的情况,往往会对盾构造成严重损害,更严重的会引发喷浆、塌方等事故;孤石的被动处置会造成环境地质破坏,工程期限延误,路面日程交通堵塞,以及投资控制的风险增加,造成的安全损失及经济损失往往很大。因此在盾构施工前,必须先探明孤石。

盾构施工地点位于深圳区域,根据统计,深圳区域盾构施工中常见孤石地质异常,孤石大小比例: 0~2.5 m > 2.5~5 m > 5~12.5 m; 分布地质区域: 强风化 > 全风化 > 残积层; 埋深范围占比: 10~20 m > 20~30 m > 5~10 m。

表 1 中是孤石模型参数,图 8 是孤石模型。模型长 200 m,深度 100 m,网格间距 0.5 × 0.5 m,即模型有 400 × 200 个网格点;正演模拟震源仍采用主频为 300 HZ 的 Ricker 子波。

Table 1. Lone rock numerical simulation model parameters
表 1. 孤石数值模拟模型参数

深度范围/m	岩石性质	纵波速度 m/s	横波速度 m/s	密度 g/cm^3
0.0~11.0	素填土(黏土, 碎石)	1700	—	2
11.0~15.0	残积层(砂质黏性土)	400	—	1.7
15.0~19.0	全风化花岗岩(孤石)	1800	1200	1.9
19.0~24.0	孤石	4500	3000	2.8
19.0~24.0	强风化花岗岩石	2000	800	2
24.0~27.0	中风化花岗岩	3000	1400	2.2

此次模型设立孤石位于 24~27 m 中风化花岗岩处, 孤石群大小(1 m, 2.5 m, 5.5 m)分为纵向排列和横向排列两种; 孤石介质纵波速度 $V_p = 4500 \text{ m/s}$, 横波速度 $V_s = 3000 \text{ m/s}$, $\rho = 2.8 \text{ g/cm}^3$; 围岩纵波速度 $V_p = 3000 \text{ m/s}$, 横波速度 $V_s = 1400 \text{ m/s}$, $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$ 。

模型 1 采取沿隧道水平方向掌子面处设置一个震源, 震源位于($x = 50 \text{ dx}$, $y = 50 \text{ dy}$), 孤石设置于($x = 130 \text{ dx}$, $y = 40 \text{ dy}$ 、 50 dy 、 70 dy)。其模型如图 8 所示。

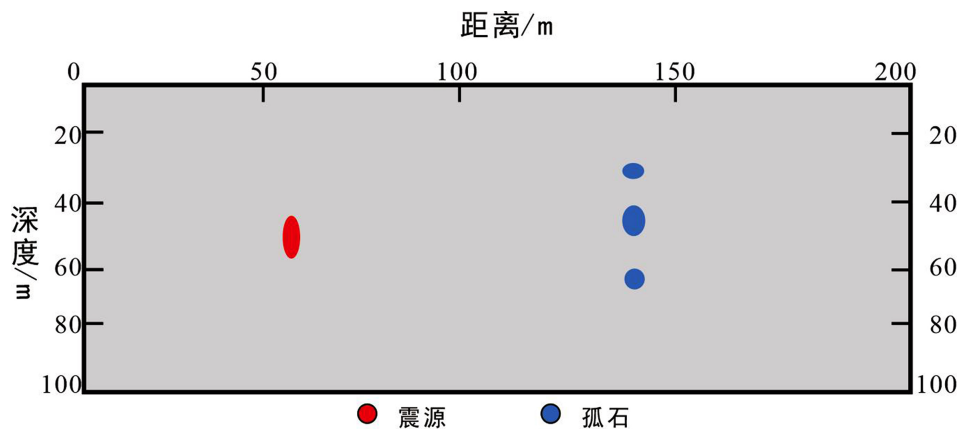


Figure 8. Tandem lone stone orthogonal model
图 8. 纵列孤石正演模型

3.2.2. 纵列孤石地震波场分析

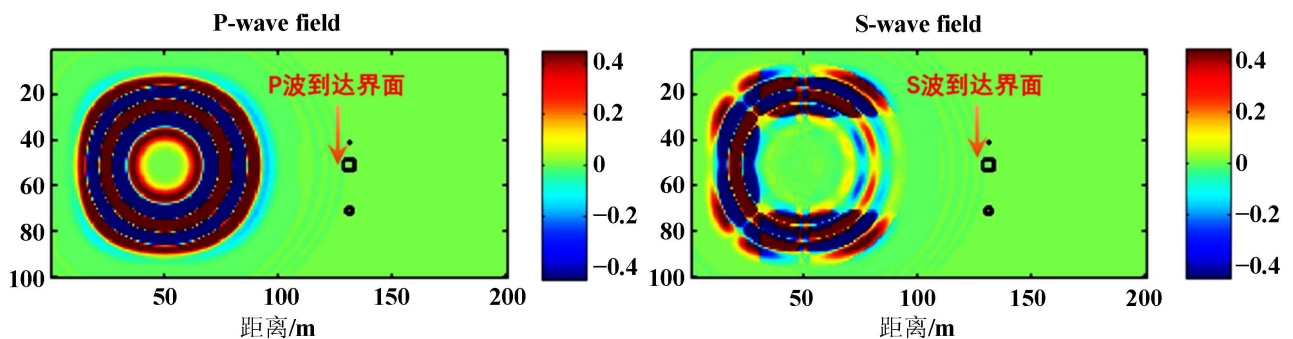


Figure 9. 30 ms seismic wave field diagram
图 9. 30 ms 地震波场图

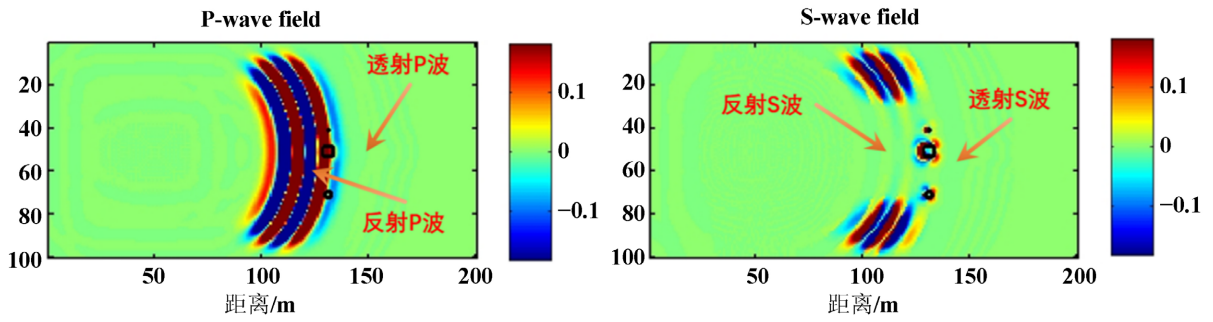


Figure 10. 50 ms seismic wave field diagram
图 10. 50 ms 地震波场图

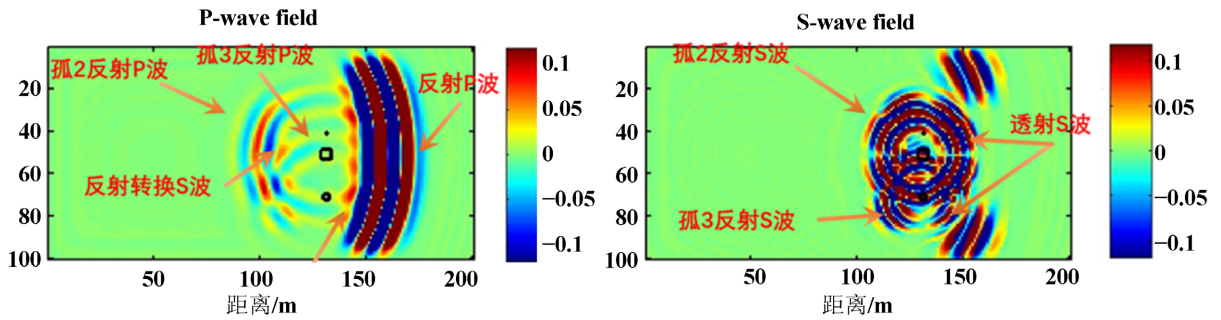


Figure 11. 65 ms seismic wave field diagram
图 11. 65 ms 地震波场图

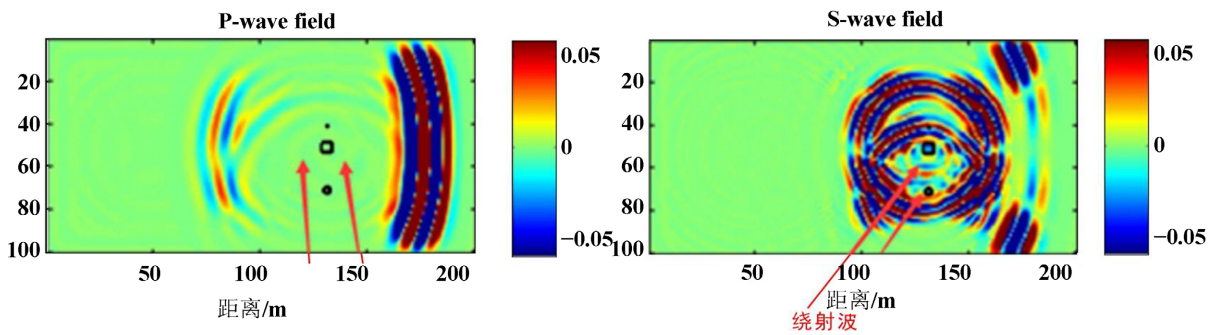


Figure 12. 80 ms seismic wave field diagram
图 12. 80 ms 地震波场图

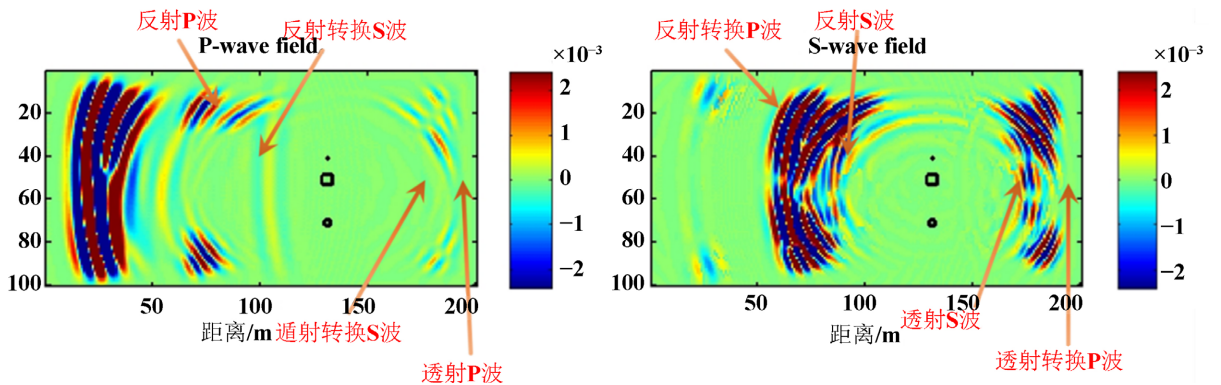


Figure 13. 110 ms seismic wave field diagram
图 13. 110 ms 地震波场图

孤石： $V_p = 4500$ m/s, $V_s = 3000$ m/s; 围岩： $V_p = 3000$ m/s, $V_s = 1400$ m/s。

传播中 P 波在遇到波阻抗差异界面时会产生波的传播会产生：反射、透射纵 S 波，反射、透射转换 P 波；并产生绕射现象。

如图 9~13 所示。

T = 30 ms 时，波前即将到达孤石面；

T = 35 ms, P, S 波在孤石处产生透射波和反射波；

T = 50 ms, P, S 波在孤石处产生透射波和反射波；横波传播到孤石位置，此时 P, S 波已经到达人工边界下边界；

T = 55 ms, P, S 波在孤石处产生透射波和反射波，及反射转换波、透射转换波；

T = 65 ms, P 波产生反射 P 波，在孤石边角处产生绕射波；S 波产生反射、透射 S 波，在孤石边角处产生绕射波；P 波转换出来的 S 波、S 波转换出来的 P 波与原来的产生的地震波场产生叠加并一起向外传播，产生新的波场；

T = 80 ms, 反射波由孤石在尖端处反射开来，可以观察到明显的绕射现象；

T = 95 ms, 孤石左方存在反射 P 波，在分界面产生的反射转换 S 波，界面右侧存在透射 P 波，在分界面产生的透射转换 s 波；孤石左侧存在反射 s 波，在分界面产生的反射转换 P 波，右侧产生透射 S 波，在分界面产生的透射转换 P 波；

T = 110 ms, 孤石左方存在反射 P 波，在分界面产生的反射转换 S 波，界面右侧存在透射 P 波，在分界面产生的透射转换 s 波；孤石左侧存在反射 s 波，在分界面产生的反射转换 P 波，右侧产生透射 S 波，在分界面产生的透射转换 P 波；

从图中可见纵横波对于孤石的反应机理，在 T = 65 ms 时纵波所形成的反射波，透射波，转换波，绕射现象可以很明显的被识别；在 T = 80 ms 时横波所形成的反射波，透射波，转换波，绕射现象可以明显的识别。

3.2.3. 横列孤石模型分析

横列孤石模型采取沿隧道水平方向掌子面处设置一个震源，震源位于(x = 50 dx, y = 50 dy)，孤石设置于(x = 50 dx, y = 100 dy、110 dy、140 dy)。其模型如图 14 所示。

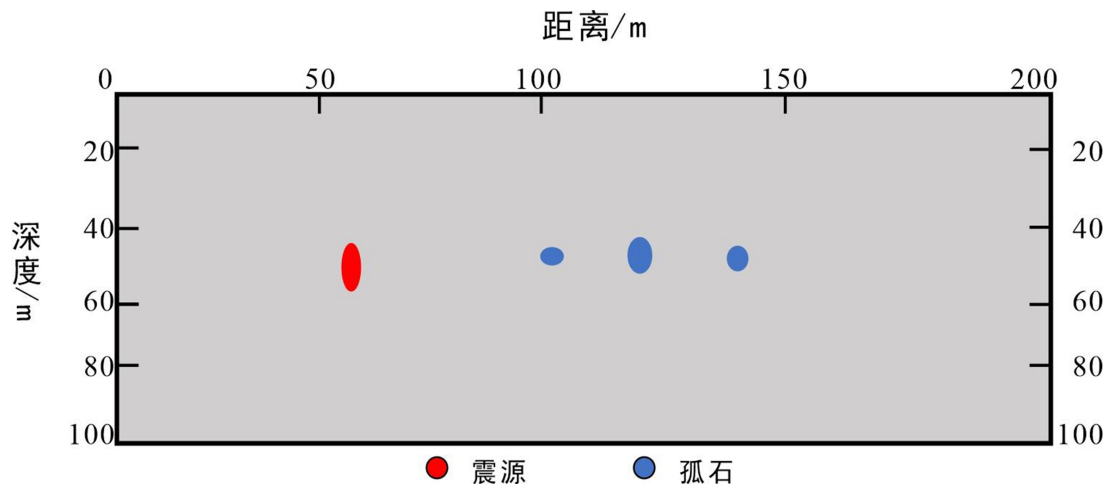


Figure 14. Lone rock orthodox model

图 14. 横列孤石正演模型

3.2.4. 横列孤石地震波场分析

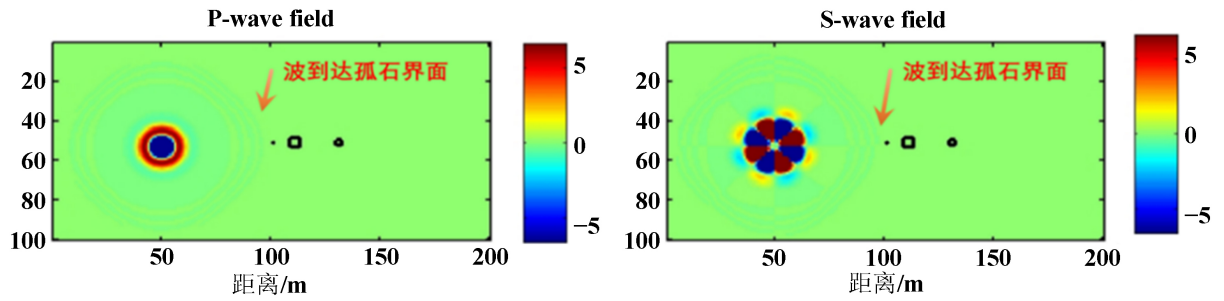


Figure 15. 15 ms seismic wave field diagram
图 15. 15 ms 地震波场图

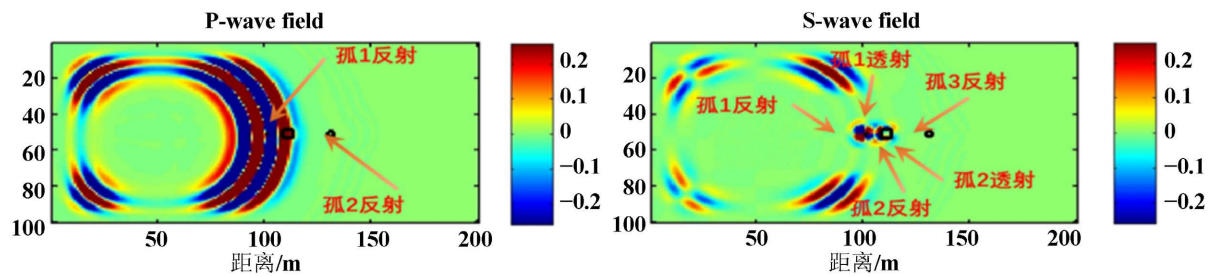


Figure 16. 40 ms seismic wave field diagram
图 16. 40 ms 地震波场图

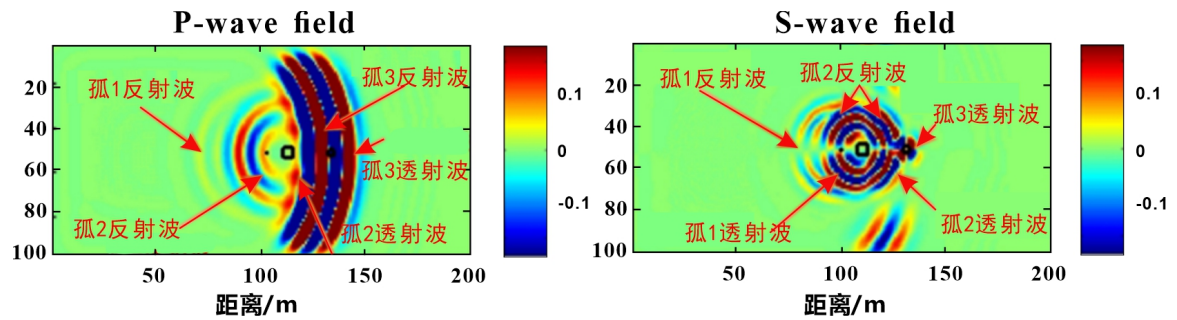


Figure 17. 55 ms seismic wave field diagram
图 17. 55 ms 地震波场图

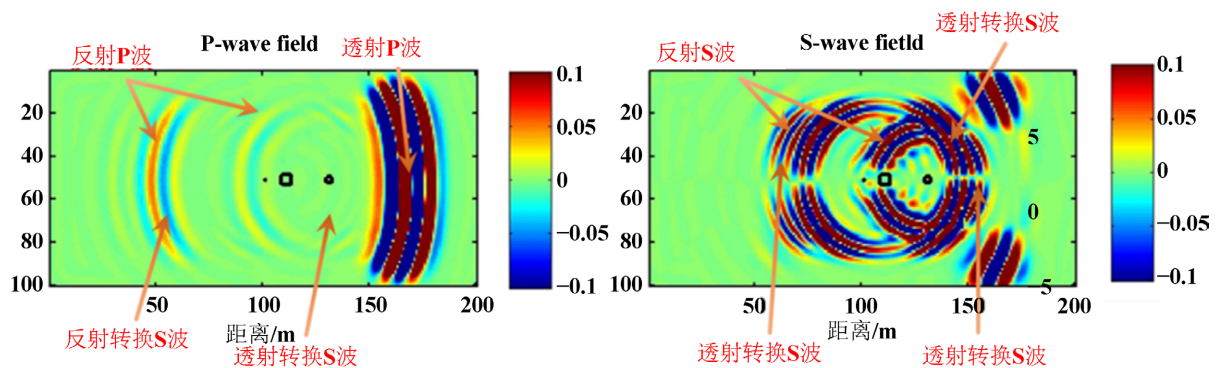


Figure 18. 75 ms Seismic wave field diagram
图 18. 75 ms 地震波场图

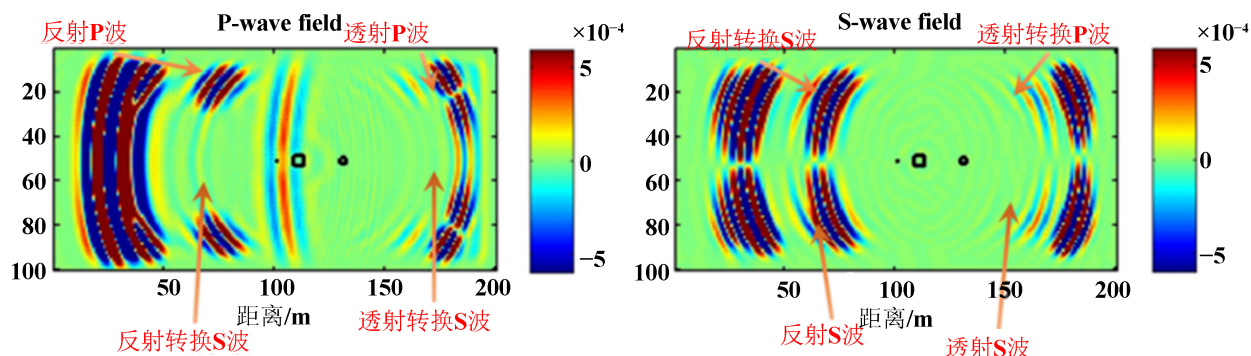


Figure 19. 110 ms seismic wave field diagram

图 19. 110 ms 地震波场图

如图 15~19 所示。

T = 15 ms 时，波前即将到达孤石面；

T = 40 ms，P，S 波在孤石处产生透射波和反射波；

T = 45 ms，P 波在孤石处产生反射波和透射波；S 波在孤石处产生反射波和透射波，在孤石边角处产生绕射波；

T = 55 ms，P，S 波在孤石处产生透射波和反射波，及反射、透射转换 P 波；

T = 65 ms，P 波产生反射 P 波，在孤石边角处产生绕射波；S 波产生反射、透射 S 波，在孤石边角处产生绕射波；转换出来的横波波场与原来的反射波及透射波等波场叠加并一起向外传播，产生新的波场；

T = 80 ms，反射波由孤石在尖端处反射开来，可以观察到明显的绕射现象；

T = 110 ms，对于 P 波：孤石左方产生反射 P 波，在孤石分界面产生反射转换 S 波，右侧产生透射 P 波，在孤石分界面产生透射转换 S 波；对于 S 波：孤石左侧产生反射 S 波，在孤石分界面产生反射转换 P 波，右侧产生透射 S 波，在孤石分界面产生反射转换 P 波；

从波场图中可以清晰地看出纵波和横波对孤石的反应机制。在 T = 55 ms 时，由纵波形成的反射波、透射波、转换波和绕射现象非常明显；而在 T = 85 ms 时，横波形成的这些现象也可以清楚地识别。这表明地震波对于纵向排列的孤石反应较横向排列的孤石更为强烈，在孤石探测中，探测孤石排列形式具有差异性。另外 P 波的能量更加集中，衰减较 S 波更弱，在波场特征识别中较为明显。P 波的波形展开更明显，S 波波形虽然弧度小，但分离特征明显。

4. 结论

本研究针对隧道空间的限制，创新性的采用了环形观测系统，以适应地质和机械设备环境。研究通过正演模拟分析地震波超前探测和隧道前方地质异常，基于简单垂直反射界面模型，设计了针对孤石异常地质构造的模型。分析了地震波传播对孤石环境的影响，提高了研究的应用性和可行性。主要结论如下：

1) 直达波和反射波时距曲线分别呈类抛物线和双曲线形状，均对称于 180° 圆心角。地震波速度越大，旅行时间越短。地层倾角的增加缩短了地震波的旅行时间，使时距曲线易于区分。反射界面倾角增大导致时距曲线曲率减小。地震正演模拟验证了这些理论时距特征的正确性。

2) 使用 Matlab 编程进行波场模拟，我们观察到地震波对孤石异常体的明显响应特征，揭示了地震波

与孤石之间的独特响应模式。这证实了环形布置方法的有效性，并为现场施工数据采集提供了重要参考和理论指导。

参考文献

- [1] 张星煜. 盾构法施工超前地质预报初探[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京市市政工程研究院, 2016.
- [2] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1114.
- [3] 曲海锋, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1246-1251.
- [4] 刘泉. 地铁隧道盾构法的施工质量控制[J]. 交通世界, 2019(14): 8-9.
- [5] 魏明乐. 基于生成对抗网络的地铁盾构超前探测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [6] 姜大鹏. 隧道超前预报及动态化施工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] 刘阳飞, 李天过, 孟陆波, 等. 提高 TSP 预报准确率及资料快速分析方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 159-166.
- [8] 肖宽怀. 物探方法在隧洞超前探测中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(5): 874-877.
- [9] 黄勳, 杜风华, 叶文. 超前地质预报技术在地铁隧道不良地质体中的应用[J]. 建筑安全, 2019, 34(7): 68-71.
- [10] 王文波. 基于三维电阻层析成像的盾构机超前探测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018, 1-6.
- [11] 陈炳瑞, 冯夏庭, 肖亚勋, 明华军, 张春生, 侯靖, 褚卫江. 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1562-1569.
- [12] 刘宏岳, 黄佳坤, 孙智勇, 等. 微动探测方法在城市地铁盾构施工“孤石”探测中的应用——以福州地铁 1 号线为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1500-1506.
- [13] 林朝旭. 地铁盾构区间孤石与基岩凸起等不良地质体探测新方法[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(4): 432-439.
- [14] 宗成兵, 田恒星. 花岗岩地层地铁隧道盾构孤石探测及处置新方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(26): 11-18.
- [15] 曹权, 项伟, 王凤华, 等. 深圳地区花岗岩球状风化体地下分布规律统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 87-90, 96.