

# 应用HSP法的TBM隧道施工地质预报技术研究

卢松<sup>1,2</sup> 汪旭<sup>1,2</sup> 李苍松<sup>1,2</sup> 孟露<sup>1,2</sup>

(1 中铁西南科学研究院有限公司,成都 611731;2 中铁科学研究院有限公司“何发亮”专家工作室,成都 611731)

**摘要** 为了减少地质预报工作对施工工序的影响和实现TBM隧道的快捷地质预报,文章结合TBM的施工环境,分析了TBM施工隧道地质预报的重难点,介绍了适用于TBM施工的HSP法原理和探测方案。该HSP法以刀盘滚刀破岩产生的震动信号为震源信号,采取多通道、长时间序列接收,通过相关干涉、聚焦成像等处理技术,获取前方地层特征参数,实现对TBM施工隧道掌子面前方不良地质的探测。通过在某双护盾TBM施工隧道中运用HSP法进行地质预报,预报结论与揭露情况一致性较好。应用结果表明,HSP法是适用于TBM隧道施工地质预报的高效方法之一。

**关键词** TBM隧道施工 地质预报 HSP法 相关干涉  
**中图分类号**:U452.11 **献标识码**:A

## 1 引言

TBM隧道施工法,以其机械化施工及其对掌子面施工人员人身安全保障等优势,近年来得到了较为广泛的应用。但其对不良地质适应性差<sup>[1]</sup>,如遇卡机,或延误工期,或导致设备报废,限制了其在复杂地质隧道施工中的应用。也因此,在复杂地质隧道掘进机施工中,开展施工地质预报工作,为不良地质的提前处治提供科学的依据,对确保掘进机的安全施工具有极为关键的作用。

近年来,HSP<sup>[2]</sup>、ISP<sup>[3]</sup>、TST<sup>[4]</sup>、RTP<sup>[5]</sup>、BEAM<sup>[6]</sup>、激发极化法<sup>[7]</sup>、复频电导技术<sup>[8]</sup>等预报技术逐步应用于TBM隧道施工地质预报中,取得了一定的成效。这些方法均以地层特征参数差异为基础,如介质波阻抗、温度场、介电差异、极化特性等,探测不良地质空间分布特征<sup>[9,10]</sup>。各方法的探测理论与实施均有其各自的特点及适应性。

中铁西南科学研究院有限公司(原铁道部科学研究院西南分院)在原HSP(水平声波剖面法)地质

预报技术基础上,研究提出了利用TBM刀盘滚刀破岩产生的震动作为激发震源的新型HSP预报技术<sup>[11]</sup>,初步实现了在TBM掘进过程中的施工地质预报探测。

## 2 TBM施工地质预报难点

TBM庞大的机体结构及施工特点,给施工地质预报探测造成了极大的困难,主要表现在:

- (1) 掌子面空间狭小,物探测线无法布置,测点布设困难;
- (2) 炸药激震实施需对区域做特殊处理,费时且存在安全风险;
- (3) 要求现场测试时间短、提交成果速度快。

因此,在开展TBM施工地质预报方法选择时,不仅要考虑方法的有效性,也要充分考虑方法实施的可行性与便捷性,采用最优的探测方法,必将事半功倍。

## 3 TBM隧道施工HSP预报技术

### 3.1 HSP法应用基础

修改稿返回日期:2019-12-31

基金项目:中国铁路总公司重大课题(2016G004-A);中铁股份有限公司重大课题(2016-重大-10)。

作者简介:卢松(1985-),男,硕士,高级工程师,主要从事工程地球物理及隧道超前地质预报技术工作,E-mail:178404719@gmail.com.

HSP法采用的是遵循惠更斯-菲涅尔原理和费马原理的地震波反射探测,其前提是介质间存在的波阻抗差异。波场传播速度、质点震动幅度等与介质的组成成分、密度、结构特征等存在密切的相关关系:

$$R_{12} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1)$$

式中: $R_{12}$ 为反射系数; $\rho$ 为介质密度; $V$ 为介质纵波速度。

断层破碎带、岩溶、地下水等地质体与背景地层岩石存在明显的波阻抗特性差异,为预报的实现提供了前提条件。

### 3.2 TBM施工HSP预报探测布置、要求及预报流程

#### 3.2.1 探测布置

TBM施工被动震源的高效利用应通过空间阵列式测试,布置方式如图1所示,在接收围岩震动回波的同时,必需要同步接收TBM机身的震动噪声。

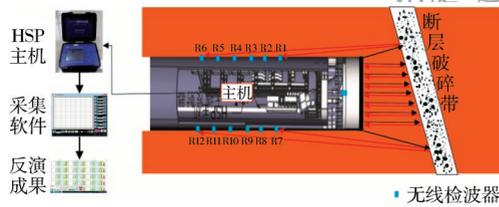


图1 TBM施工HSP探测布置示意  
Fig.1 Arrangement of HSP detection points

#### 3.2.2 探测要求

TBM完全掘进状态下,连续接收同一时段内的震动信号,数据量应足够大,通常不少于10 min,确保从足量的原始数据中提取出有用信号,进行包括时域波形分析、频谱分析、数字滤波、相关干涉分析、反射成像、时深转换、物探异常提取、地质解译等,最终获取前方不良地质空间位置及范围,完成地质预报工作,指导TBM施工。

#### 3.2.3 预报流程

图2为TBM施工HSP法预报流程图。

在数据处理流程中,通过对记录信号进行相关干涉处理,即将非震源接收点震动信号进行互相关处理,获取等效虚拟震源<sup>[13-15]</sup>,得到一个新的共炮点道集信号,相当于以某个接收点为震源点,其它接收点为接收点的记录。获取新的信号不仅包含了原始震动信号的特性,而且能反映出原始信号所不具有的某些重要的特征,并将信号中具有相同特征或规律性信息放大,提高信号的信噪比,进而获取地质结构特征信息。

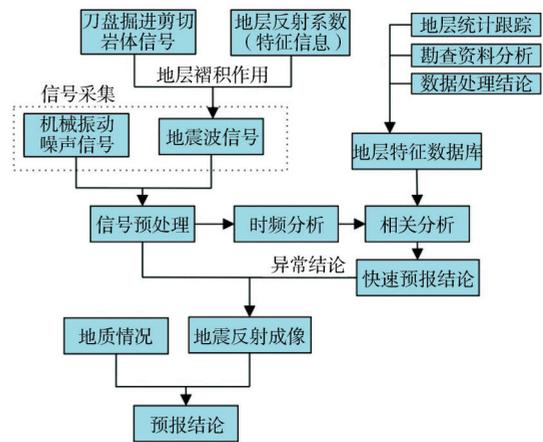


图2 HSP探测流程  
Fig.2 Flow chart of HSP detection

具体的单道数据互相关计算,可以通过任意选取 $f(n)$ 和 $g(n)$ (其中: $n$ 为0到 $N-1$ )两组离散信号,其互相关函数 $R(n)$ 的定义见式(2)。

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} f(m) g(n+m) \quad (2)$$

反射成像技术采用的是椭球理论,对掌子面前方空间进行速度修正与椭球聚焦成像<sup>[16,17]</sup>,获取地层特征数据,用以指导施工。

### 3.3 TBM施工被动源波场正演研究

与爆破震源相比,TBM施工时刀盘滚刀破岩震源为持续震源,爆破震源为瞬间震源。结合多源地震干涉技术,利用真实的破岩信号(图3)作为激发震源,对不同地质模型进行地震波的传播规律的模拟研究。

#### (1) 断层模型(富水、贫水)

TBM施工断层模型主要参数见表1。模型大小为400 m×400 m,隧道截面宽10 m,位于模型垂直方向的195~205 m。震源点位于掌子面上,隧道已开挖40 m。断层距离掌子面垂直距离110 m,宽度为2 m,贯穿整个模型。

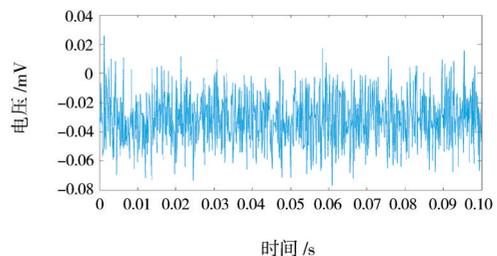


图3 滚刀破岩信号  
Fig.3 Signal of rock breaking by cutters

表1 断层模型参数

Table 1 Parameters of the fault model

参数名称	贫水模型数值	富水模型数值
围岩 $v_p$ / (m/s)	3 000	3 000
围岩 $v_s$ / (m/s)	1 800	1 800
围岩密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.6
断层 $v_p$ / (m/s)	2 200	1 800
断层 $v_s$ / (m/s)	1 300	300
断层密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	2.4	2.2

图4为断层模型数值模拟的波场图(860 ms)。由图4可以看出,富水破碎带发生了明显的反射,且较贫水断层更为强烈,反射界面也更加清晰。

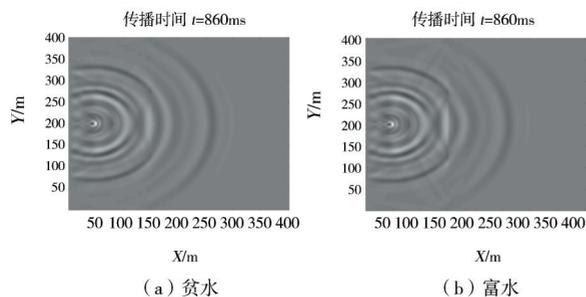


图4 模拟断层模型波场 860 ms 快照图

Fig.4 860 ms snapshot of wave field for simulated fault model

(2) 溶洞模型(富水、贫水)

表2为TBM施工溶洞模型主要参数。模型大小为400 m×400 m。隧道宽度为10 m,位于模型垂直方向的195~205 m,已开挖长度为40 m。溶洞中心距离掌子面垂直距离110 m,半径为2 m。

表2 溶洞模型参数

Table 2 Parameters of the karst cave model

参数名称	空腔模型数值	富水模型数值
围岩 $V_p$ / (m/s)	3 000	3 000
围岩 $V_s$ / (m/s)	1 800	1 800
围岩密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.6
溶洞 $V_p$ / (m/s)	340	1 300
溶洞 $V_s$ / (m/s)	0	0
溶洞密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.0

图5为溶洞模型数值模拟的波场图(860 ms)。由图5可以发现,由于TBM在掘进时所产生的震源的复杂性,且充水溶洞模型与无填充溶洞模型参数设置上主要是纵波速度及密度的变化,波场快照与无填充空洞比较相似。

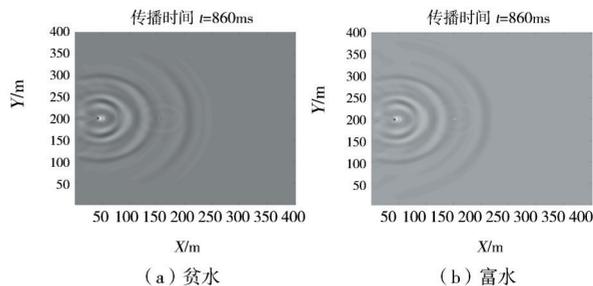


图5 模拟岩溶模型波场 860 ms 快照图

Fig.5 860 ms snapshot of wave field for simulated karst cave model

正演模拟表明:

- (1) 当隧道前方存在不良地质体时,地震波场存在明显的异常反射;
- (2) 同一地质模型,无充填岩溶正演波场能量较充水岩溶波场能量弱;
- (3) 同一地质模型,富水破碎带正演波场能量较贫水破碎带波场能量弱;
- (4) 同一地质模型,不良地质体内富水正演波场与贫水波场特性差异较小,主要区别在于对横波能量的吸收,区分难度较大。

### 3.4 TBM施工HSP系统要求

TBM施工工况与钻爆法存在较大的差异,如空间小、干扰源丰富、机械震动大、湿热变化大等,这给TBM施工预报设备系统提出了更高的要求,如设备的稳定性、采集信号动态范围、检波器频宽等等。为更好地适应TBM施工工况,HSP系统经过多次在不同洞径和工况下进行实验,实现了信号无线传输技术及动态掘进过程中设备系统的抗干扰能力和宽频带弯扭式检波设备等多项技术研发。图6为HSP217地质超前预报仪。

## 4 双护盾TBM施工HSP法应用实例

### 4.1 工程地质概况

该隧道地处高海拔地区,自然环境恶劣,沿线交通条件极差,传统勘探手段受到严重限制,地质勘探工作主要是在区域地质构造基础上进行地质宏观分析。隧道岩性主要为花岗片麻岩。

工程区内无区域性主干断裂通过,但韧性剪切带、次级小断层发育。地表调查表明,DXL山为一宽缓的背斜,背斜北西翼位于DXL山北坡,片麻理产状为近SN/W $\angle$ 15°~20°;背斜南东翼位于DXL山南坡,片麻理产状为近SN/E $\angle$ 20°~25°,受多期次构



图6 HSP地质超前预报仪

Fig.6 HSP advance geological forecast device

造运动影响,岩石中揉皱发育。地质调查划分为6个重点区段,见表3。

#### 4.2 HSP法探测

针对该工程双护盾TBM施工段,选取K10+073~K10+173和K10+500~K10+600里程段,采用HSP地质预报仪进行探测,并对采集的震动信号进行数据处理及反射成像,最终获取的地层特征参数,具体成果图见图7、图8,成果解译见表4。

实例1中,K10+080~K10+173里程段范围内反射能量团较强,以交替形式出现,且其时域空间内波形相位反向,分析认为该里程范围内岩体阻抗差异,存在不良地质体。

表3 地表地质调查重要风险区统计

Table 3 Statistics of important risk areas in surface geological survey

序号	里程范围	区段描述	风险特点
1	K9+800~+900	陡倾长大裂隙影响区	易发生裂隙充水、夹泥现象,影响围岩岩体强度与自稳能力
2	K10+200~+450	高地应力影响区	易发生掌子面岩体崩落,较易发生岩爆及其岩体弹射现象
3	K10+450~K11+520	背斜核部构造及地表冰湖水排泄影响区	围岩自稳能力较差,易发生松弛掉块,较易发生坍塌;局部区域易发生股状出水,在一定的外界条件促发下较易发生涌突水
4	K12+020~+440	高地应力影响区	易发生掌子面岩体崩落,较易发生岩爆及其岩体弹射现象
5	K12+580~+900	背斜翼部主动侧构造影响区	地形起伏大,呈现陡坡、洼地、平台等微地貌,洞身段岩体破碎程度高,裂隙发育,裂隙易充水夹泥
6	K13+100~+487	松散崩坡堆积影响区	岩土体松散、基本无粘结轻度,易形成孤石与相对细粒土伴生的软硬不均地段

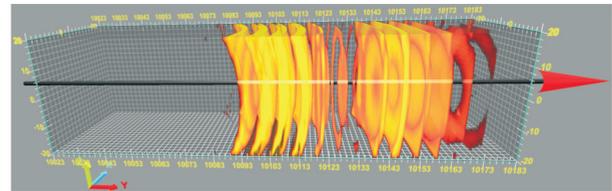


图7 K10+073~K10+173段反演分析成果图

Fig.7 The inversion analysis at K10+073-K10+173

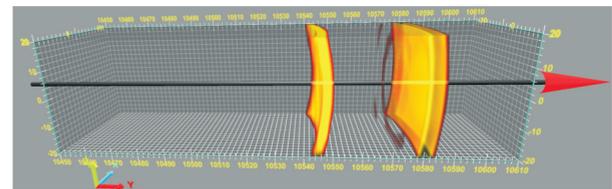


图8 K10+500~K10+600段反演分析成果图

Fig.8 The inversion analysis at K10+500-K10+600

表4 HSP预报成果

Table 4 The results of HSP prediction

序号	测试范围	长度/m	物探分析	地质解释
实例1	K10+073~K10+080	7	未见明显反射异常	该段围岩较完整至较破碎,局部节理裂隙较发育
	K10+080~K10+173	93	存在较强反射能量团,且交替出现,时域波形相位反向	节理裂隙发育,岩体较破碎—破碎,结构面结合较差,局部有裂隙破碎带及长大不利结构面发育,易沿结构面掉块、坍塌
实例2	K10+500~K10+543	43	未见明显反射异常	围岩稳定性较好、完整性较好
	K10+543~K10+549	6	存在反射能量团	岩体较破碎—破碎,结构面结合较差,局部有裂隙破碎带,易沿结构面掉块、坍塌
	K10+549~K10+572	23	未见明显反射异常	围岩整体稳定性较好、完整性较好
	K10+572~K10+585	13	存在反射能量团	岩体较破碎—破碎,结构面结合较差,局部有裂隙破碎带,易沿结构面掉块、坍塌
	K10+585~K10+600	15	未见明显反射异常	围岩整体稳定性较好、完整性较好

实例2中,在K10+543~K10+549、K10+572~K10+585里程段范围内存在反射能量团,分析认为该里程范围内岩体阻抗差异,存在不良地质体。

### 4.3 揭露情况

围岩揭露情况与预报结论一致性良好,见图9,具体表现为:

(1) K10+080~K10+173里程段内,围岩破碎,



图9 围岩揭露情况(左: K10+086; 右: K10+574)

Fig.9 The disclosed surrounding rocks (Left: K10+086, Right: K10+574)

不利于结构面和破碎带发育,结构面结合差,出现掉块与坍塌,导致TBM卡机;

(2) K10+500~K10+600, K10+500~K10+543和K10+549~K10+572段围岩较完整;K10+543~K10+549和K10+572~K10+585段围岩节理裂隙发育。

## 5 结论

(1) 采用空间阵列式测试布置方法,利用TBM刀盘滚刀破岩产生的震动作为震源激发信号,开展双护盾式TBM隧道施工地质预报,效果良好。

(2) TBM施工HSP法地质预报方法,可较好地适合TBM施工环境,不影响施工,测试便捷,对于TBM施工隧道前方不良地质体的预报,具有重要的意义。

### 参考文献

#### References

- [1] 尼克·巴顿. 节理断层破碎岩体的隧道掘机开挖[M]. 方中权译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
NICK BARTON. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Roc[M]. Translated by FANG Zhongquan. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] 卢松, 孟露, 汪旭, 等. HSP法隧道超前地质预报技术及图像分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增1): 144-149.  
LU Song, MENG Lu, WANG Xu, et al. HSP Method Based Tunnel Geological Prediction and Image Analysis[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S1): 144-149.
- [3] 吕二超. ISP地质预报系统在引汉济渭工程岭北TBM施工中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2016(6): 52-55.  
LV Erchao. ISP Geological Prediction System Applied in the TBM Construction of the Hanjiang to Weihe Project[J]. Railway Construction Technology, 2016(6): 52-55.
- [4] ZHAO Yonggui, JIANG Hui, ZHAO Xiaopeng. Tunnel Seismic Tomography Method for Geological Prediction and Its Application[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(2): 69-74.
- [5] 何发亮, 郭如军, 李苍松, 等. 岩体温度法隧道施工掌子面前方涌水预报[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.  
HE Faliang, GUO Rujun, LI Cangsong, et al. Prediction of Water Inflow in Front of Working Face of Tunnel Construction by Geothermal Method[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
- [6] 朱劲, 李天斌, 李永林, 等. Beam超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J]. 工程地质学报, 2007(2): 258-260.  
ZHU Jing, LI Tianbin, LI Yonglin, et al. Application of an Electrical Method "BEAM" for Advanced Geological Exploration to Tunneling in Tongluo Mountains for Dian-Lin Highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2007(2): 258-260.
- [7] 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): 1090-1113.  
LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, et al. State of Art and Trends of Advanced Geological Prediction in Tunnel Construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [8] 贺建明, 邱贤德. 复频电导技术在隧洞超前探水中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1988(4): 83-90.  
HE Jianming, QIU Xiande. Application of Complex Frequency Conductance Technology in Tunnel ahead of Water Exploration[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 1988(4): 83-90.
- [9] 何发亮, 李苍松, 陈成宗. 隧道地质超前预报[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.  
HE Faliang, LI Cangsong, CHEN Chengzong. Tunnel Geological Prediction[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006.
- [10] 李苍松. 长大岩溶隧道施工地质预报方法综述[C]//中国交通土建工程学术暨建设成果论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.

- LI Cangsong. Review of Geological Prediction Methods for the Construction of Long and Large Karst Tunnels[C]// Proceedings of the Academic and Construction Achievements of China Traffic Civil Engineering. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.
- [11] 李苍松,谷婷,丁建芳,等. 适合于TBM施工的HSP声波反射法地质超前预报[C]//第八届全国工程地质大会论文集, 2008.  
LI Cangsong, GU Ting, DING Jianfang, et al. Horizontal Sound Probing(HSP) Geology Prediction Method Appropriated to TBM Construction[C]//Proceedings of the Eighth National Symposium on Engineering Geology, 2008.
- [12] 张镜剑. TBM的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 363-367.  
ZHANG Jingjian. The Application and Some Problems of TBM and Its Prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (3): 363-367.
- [13] 赵健,李勇. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.  
ZHAO Jian, LI Yong. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [14] 杨福军,孙福利,黄伟传,等. 地震干涉偏移在随钻地震资料处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 602-605.  
YANG Wenjun, SUN Fuli, HUANG Weichuan, et al. Application of Seismic Interferometric Migration in Seismic While Drilling (SWD)Data Processing[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(2): 602-605.
- [15] 朱恒,王德利,时志安,等. 地震干涉技术被动源地震成像[J]. 地球物理学进展, 2012,27(2):496-502.  
ZHU Heng, WANG Deli, SHI Zhi'an, et al. Passive Seismic Imaging of Seismic Interferometry[J]. Progress in Geophysics, 2012,27 (2):496-502.
- [16] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京:中国地质大学出版社,1998.  
WANG Jiaying. Inverse Theory in Geophysics[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1998.
- [17] 王华忠,冯波,等. 地震波反演成像方法与技术核心问题分析[J]. 石油物探, 2015,54(2):115-125.  
WANG Huazhong, FENG Bo, et al. Analysis of Seismic Inversion Imaging and Its Technical Core Issues[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015,54(2):115-125.

## Study on Geological Prediction Technology of HSP Method for TBM Tunnel

LU Song<sup>1,2</sup> WANG Xu<sup>1,2</sup> LI Cangsong<sup>1,2</sup> MENG Lu<sup>1,2</sup>

(1 China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731; 2 "HE Falang" Expert Studio, China Railway Academy Co., Ltd. Chengdu 611731)

**Abstract** In order to reduce the influence of geological prediction on construction procedure and realize efficient geological prediction for TBM tunnels, this paper analyzes the key points and difficulties of geological prediction in TBM tunnel considering the construction environment, introduces the principles and detection scheme of HSP method which is suitable for the TBM tunnels. The HSP method can directly use seismic waves excited by TBM cutters as source signal and obtain stratigraphic characteristic parameters by adopting the technologies of multichannel, long-time, sequence receiving, correlation interference and focusing imaging during data acquisition, realizing geological prediction in front of tunnel working face. The HSP method is applied to a double shield TBM tunnel and the prediction results are in good agreement with the actual geological conditions of the surrounding rocks, it shows the HSP method is one of the efficient geological prediction methods suitable for TBM tunnels.

**Keywords** TBM tunnel; Construction; Geological prediction; HSP method; Correlation interference