doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 023

孙浩, Dickmann Thomas, Xiao Shuan, 等. 无间断同步超前预报——TSP连续测量技术在TBM隧道掘进中的应用研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 232-240.

Sun Hao, Dickmann Thomas, Xiao Shuan, et al. Continuous synchronous advance prediction: application research of TSP continuous measurement technology in TBM tunnel excavation[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 232-240.

无间断同步超前预报——TSP连续测量技术在TBM隧道掘进中的应用研究

孙　浩[1,2], Dickmann Thomas[2], Xiao Shuan[2], Krueger Dirk[2]

(1. 安伯格技术(武汉)有限公司, 武汉 430070;
2. Amberg Technologies AG, Zurich, Switzerland 8105)

摘　要: 深部金属矿山TBM开拓巷道普遍赋存高地应力、区域性断裂破碎带、软弱蚀变夹层与局部富水体等复杂不良地质, 易诱发突泥涌水、围岩大变形、TBM刀盘卡机等地质灾害; 传统炸药震源地震法、水平超前钻探均为停机探测模式, 存在工序冲突、预报间断、探测成本高等技术短板。以山东深部金属矿山敞开式TBM 工程为依托, 本文系统阐述TSPwE随掘连续测量技术的弹性波成像理论、TBM盾体集成滚动观测布设工艺、现场同步采集流程及TSP Ease配套数据处理方法; 基于矿区实测三维纵、横波速度场成果, 明确该技术实现时间上随掘随测、空间上滚动衔接无盲区, 超前连续成像、岩体力学参数定量反演、适配狭小盾内密闭空间等核心优势, 并经现场开挖揭露与多批次测量对照验证。波速模型、动态杨氏模量可精准圈定掌子面前方断层、破碎带、含水异常区, 有效划分破碎危险围岩段, 为TBM掘进参数动态调控、超前注浆加固、支护体系优化提供实时三维地质支撑。研究表明, TSPwE采用气动冲击锤无爆破震源、滚动重叠观测窗口与全局平滑正则反演算法, 可完全匹配TBM循环掘进工序, 减少地质预报占用工期; 该成套技术对深部硬岩矿山TBM安全、高效掘进具备广泛工程推广价值。

关键词: TSPwE; 连续测量; TBM; 超前地质预报; 岩体力学参数

中图分类号: TD421. 5; TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0232-09

Continuous synchronous advance prediction: application research of TSP continuous measurement technology in TBM tunnel excavation

Sun Hao[1,2], Dickmann Thomas[2], Xiao Shuan[2], Krueger Dirk[2]

(1. Amberg Technology(Wuhan)Co., Ltd., Wuhan 430070, China;
2. Amberg Technologies AG, Zurich 8105, Switzerland)

Abstract: TBM-excavated roadways in deep metal mines are frequently subjected to high in-situ stress, regional fracture zones, weak altered interlayers and localized water-rich zones, which can trigger water-mud inrush, severe rock deformation and cutterhead jamming. Conventional seismic prediction with explosive sources and horizontal advance drilling both interrupt excavation for each survey, making forecasting discontinuous and costly. This paper, based on an open TBM project in a deep metal mine in Shandong, presents the elastic-wave imaging theory of TSPwE concurrent continuous measurement, the shield-integrated rolling receiver layout, and the on-site acquisition and processing workflow. Field-derived 3D P and S-wave velocity models demonstrate continuous synchronous acquisition within excavation cycles, continuous spatial coverage with overlapping rolling windows (no blind zones), imaging up ahead of the face, quantitative

收稿日期: 2026-07-23

基金项目: 企业科技研发项目(Nos.002)

作者简介: 孙　浩, 硕士研究生, 主要从事隧道超前地质预报、大地电磁数据处理与反演解释。

inversion of rock mechanical parameters, and adaptability to the confined shield interior. Predictions agree well with actual excavation exposures and repeated surveys. The velocity models and dynamic Young's modulus delineate frontal faults, fracture zones and water-bearing anomalies, identify fractured hazardous ground, and provide real-time 3D constraints for TBM driving parameters, advance grouting and support optimization. TSPwE achieves these results with non-blasting pneumatic hammer sources, overlapping rolling observation windows and globally smoothed regularized inversion, matching cyclic TBM excavation with minimal disruption to geological prediction, The method is readily applicable to safe ad efficient TBM excavation in deep hard-rock mines.

Key words: TSPwE; continuous measurement; TBM; advance geological prediction; rock mass mechanical parameters

我国深部矿山开采逐步向千米地层延伸，胶东三山岛、焦家等大型金矿普遍采用TBM开拓巷道以提升掘进效率与作业环境。深部巷道埋深超1 000 m，沿线区域性断裂与密集节理带发育，局部存在软弱夹层与蚀变破碎岩体；高地应力下围岩易失稳，诱发拱顶坍塌、突泥涌水、刀盘抱死、盾体挤压变形等连锁灾害[1-2]。连续精准探测掌子面前方不良地质并动态调整掘进参数，是防控TBM卡机与突水灾害的核心技术难题。超前地质预报可探查前方未开挖地层、识别不良地质与水文隐患，历经数十年发展已成为隧道施工必备手段。其中地震波法凭借预报距离远、分辨率高、适应性强，应用规模与成功率领先；TSP (Tunnel Seismic Prediction) 系统作为其代表性技术，由瑞士Amberg Technologies 公司开发，已在全球数万千米隧道工程中得到应用验证[3]。

深埋长大隧洞应用TBM后，掘进速度快、盾内空间狭小、工序衔接紧凑，传统预报手段难以匹配掘进节奏，无法实现实时连续地质感知，制约施工安全与掘进效率。现有TBM配套探测方法均存在局限：水平超前钻探需停机数小时，仅能获取单点线状信息，无法刻画破碎带三维分布，且成本高、效率低；传统间歇式TSP每掘进50～70 m即停机钻孔、采用炸药震源，中断掘进流程，密闭盾体内爆破存在安全隐患[4]，且传统算法未区分开挖区与待掘区波速差异，进一步降低预报精度；TRT难以在盾体内布设，机械噪声干扰信号采集；地质雷达受金属盾体电磁屏蔽影响，预报距离有限；HSP、CSAMT、BEAM 等方法在预报精度与TBM 适配性上均有短板[5]。为突破预报与掘进工序冲突，国内外开展了TBM随掘连续探测研究，一类以滚刀破岩振动为被动震源，另一类为TSPwE®(TSP while Excavation)连续测量系统。该系统采用气动冲击锤震源，无需额外停机，随掌子面滚动采集并实时更新预报成果[6]。当前随掘探测正由“停机间断预报”向“随掘随探”转型，并向多源信息融合、智能化定量解释发展。

本文的创新主要体现在理论与应用两个层面：理论层面，将传统TSP以固定掌子面为坐标基准的观测几何拓展为全局固定里程坐标系下的滚动重叠观测几何，提出跨批次平滑正则化的全局反演算法，从观测几何与反演机理两方面消除速度场分段跳变，实现移动掌子面前方连续无间断的三维速度场重构。应用层面，采用气动冲击锤可控震源替代炸药震源，配套无线数据传输工艺，破解密闭盾体内爆破安全隐患与狭小空间布设难题，并在深部金属矿山敞开式TBM密闭盾体、高地应力破碎围岩工况下开展TSPwE技术系统验证，实现超前连续成像、岩体力学参数定量反演及与掘进循环的全流程工序集成，同时结合现场开挖揭露开展预报成果对照检验。

本文依托某深部金属矿山敞开式TBM工程，开展TSPwE成套技术理论分析与现场试验。详细阐述其基础原理、盾体集成布设工艺、数据采集与处理流程；结合现场实测数据量化论证其不停机、长距离连续成像、岩体力学参数定量反演、适配狭小盾内空间四大特点，验证该技术在深部矿山TBM掘进中的可行性与工程适用性，为深部硬岩矿山TBM安全高效掘进提供技术支撑与工程参考。

1　TSPwE 连续测量技术基本原理与布设工艺

TSPwE数据采集、处理、解释均建立在各向同性线弹性介质地震反射理论之上，岩体可近似为均质弹性介质，震源激发弹性波在介质内传播，遇波阻抗分界面产生反射信号，由三分量传感器接收[7]。忽略岩体各向异性与孔隙流体复杂耦合效应，建立二

维剖面时域速度-应力耦合波动方程，描述冲击锤锤击后质点振动与应力传递规律，是TSP Ease软件正演模拟的核心控制方程：

$$\begin{cases}\rho\dfrac{\partial v_x}{\partial t}=\dfrac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}\\ \rho\dfrac{\partial v_z}{\partial t}=\dfrac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x}+\dfrac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\\ \sigma_{xx}=(\lambda+2\mu)\dfrac{\partial v_x}{\partial x}+\lambda\dfrac{\partial v_z}{\partial z}\\ \sigma_{zz}=(\lambda+2\mu)\dfrac{\partial v_z}{\partial z}+\lambda\dfrac{\partial v_x}{\partial z}\\ \sigma_{xz}=\mu\left(\dfrac{\partial v_x}{\partial z}+\dfrac{\partial v_z}{\partial x}\right)\end{cases} \tag{1}$$

式中，ρ为岩体密度；v_x、v_z分别为质点水平和竖向振动速度；σ_{xx}、σ_{zz}为正应力；σ_{xz}为剪应力；λ为第一拉梅常数；μ为剪切模量。

传统TSP观测系统以固定掌子面为坐标基准，无法匹配TBM每循环持续向前掘进的工况[6]。针对盾体密闭、掌子面动态前移的工程约束，TSPwE创新设计全局固定里程坐标系＋滚动观测窗口几何体系，建立震源、检波器随掌子面更新的坐标方程，给出直达波、反射波走时几何关系，为后续层析反演提供几何输入数据。建立三维固定坐标系：X沿隧道掘进里程方向，Y为隧道横向，Z为竖向高程；定义F_n为第n次TBM推进完成后的掌子面里程。滚动观测核心设计逻辑：一组检波器覆盖10～12个连续锤击点位，采集满额定炮数后，将前组检波器整体移动至后组初始位置，后组继续采集新炮点，相邻两批次观测炮集空间重叠，几何约束不等式：

$$\left[F_n-L_{\max},F_n\right]\cap\left[F_{n+1}-L_{\max},F_{n+1}\right]\neq\varnothing \tag{2}$$

式中，$L_{\max}$为单组检波器最大轴向覆盖长度。重叠区间保证多批次数据可联合约束，消除速度场分段跳变，区别于传统无重叠观测模式。

依托弹性波速公式与坐标模型，可计算任意震源、检波器之间理论传播时间。震源至检波器直达波理论走时：

$$t_{\mathrm{dir}}(S_{\mathrm{k}},R_{\mathrm{m}})=\frac{\sqrt{\left(X_{R_{\mathrm{m}}}-X_{S_{\mathrm{k}}}\right)^2+\left(Y_{R_{\mathrm{m}}}-Y_{Z_{\mathrm{m}}}\right)^2+\left(Z_{R_{\mathrm{m}}}-Z_{S_{\mathrm{k}}}\right)^2}}{V_{\mathrm{avg}}} \tag{3}$$

式中，V_{avg}为当前区段平均纵波速度，由初始地质资料给定，迭代过程持续更新。

地震波从震源传播至反射界面，再反射至检波器的总传播时长，同一走时的全部空间点构成椭圆，这是后续偏移处理的核心依据[8]。掌子面前方反射点$P(x,y,z)$总走时：

$$t_{\mathrm{ref}}(S_{\mathrm{k}},P,R_{\mathrm{m}})=\frac{|S_{\mathrm{k}}-P|}{V_{\mathrm{p}}}+\frac{|P-R_{\mathrm{m}}|}{V_{\mathrm{p}}}\left|S-P\right|=\sqrt{\left(X_{\mathrm{p}}-X_{\mathrm{S}}\right)^2+\left(Y_{\mathrm{P}}-Y_{\mathrm{Z}}\right)^2+\left(Z_{\mathrm{P}}-Z_{\mathrm{S}}\right)^2} \tag{4}$$

观测系统采集得到原始地震记录，由于噪声的影响无法直接用于波场分离，因此，TSPwE采用同一点位多次锤击相干叠加算法，先对原始波形降噪，输出高质量地震道，作为三分量极化分解的输入数据。经过叠加降噪得到高质量三分量原始振动记录，地震记录同时混杂P、S_{V}、S_{H}三类波，三者传播、响应特征不同，若混合参与速度反演会大幅降低成像精度。基于弹性波振动极化差异，构建协方差特征分解模型，将地震记录分解成三类独立波场，分别生成P、S两套速度输入数据。利用波的实测传播走时，构建数值反演模型求解掌子面前方三维V_{P}、V_{S}速度场。TSPwE依托滚动窗口重叠观测条件，引入跨批次平滑正则项，建立全局最小二乘目标函数，实现连续、无跳变速度场重构。全局目标函数如下：

$$J_{\mathrm{total}}(m)=J_{\mathrm{residual}}+\alpha\iiint\left|\nabla V_{\mathrm{p}}(x)\right|^2\mathrm{d}V \tag{5}$$

式中，α为正则化权重系数，完整硬岩段增大α平滑随机扰动；破碎、含水异常区减小α，保留低速突变特征。该式是TSPwE区别于传统TSP的核心数值创新，实现连续无分段速度场输出。

TSPwE的连续测量是在盾构机每次推进一个行程后立即进行一次激发与数据采集，整个过程中不间断进行测量。与标准TSP布设不同的是，该方式在初始阶段仅使用一对接收器采集前半段激发点的数据，随后第二对接收器加入布设：当第一对接收器完成约20～24个激发点的数据采集后，即整体前移至盾构机前方的原始安装位置，期间第二对接收器已同步采集约10～12个激发点的数据；待其累计完成20～24个激发点的采集后，亦再次前移，进入下一轮测量循环，相邻批次观测炮集在空间上保持重叠(图1)。由此，TSPwE与盾构掘进作业周期实现全流程集成，测量效率显著提高，这一同步集成模式也赋予“无间断”明确的时间与空间内涵。时间

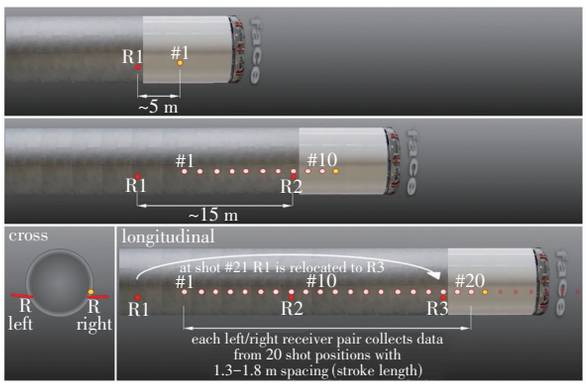


图 1　TSPwE 在盾构隧道中的布设示意图：包括 4 个接收器与 20 个激发点

Fig. 1　Layout diagram of TSPwE in shield tunnels: containing 4 receivers and 20 shot points

维度上，每次激发采集被嵌入 TBM 循环掘进的自然工序间隙内，每完成一个掘进行程即自动完成数据采集，无需为探测单独停机，探测周期与掘进循环一一对应，实现了相对传统“停机-钻孔-放炮-采集”间断模式的连续同步；空间维度上，相邻批次观测窗口的炮集空间重叠，检波器组前移后仍与已采集炮点保持重合约束，配合跨批次平滑正则化反演，使掌子面前方预报范围内均有足量观测信息约束，不存在传统间断探测的空间盲区，空间覆盖由滚动重叠观测窗口保证，预报精度随观测信息积累持续提升。

2　结果分析

该区域所处大地构造位置：华北陆块(Ⅰ)、胶辽隆起区(Ⅲ)、胶北隆起区(Ⅲa)、胶北断隆(Ⅲa1)、胶北凸起(Ⅲ3a1)。其西邻沂沭断裂带(Ⅱc)，东靠与金矿成矿有密切关系的中生代玲珑序列(前称玲珑复式岩体)及郭家岭序列侵入岩。区域地质北起马家埠、南至平里店，西自刁龙咀、东到梁郭镇。面积约 540 km^2。此范围包括了三山岛-仓上和新城-焦家两条重要的金矿控矿断裂，大中型金矿床密集分布。矿区构造主要为 NE 向三山岛-仓上断裂(F1)，次为 NW 向三山岛-三元断裂(F3)、根据前期地质资料解译发育北西向断层(F4、F5、F6)，TBM 掘进线路岩性主要为二长花岗岩、构造蚀变岩，硬度值 $f \leqslant 15$，掘进线路周边分布有 F1、F2、F4、F5 断裂带，其中 F2、F4、F5 断裂带对线路影响不大，与线路相交的为 F1 断裂带。矿区构造分布位置见图 2。

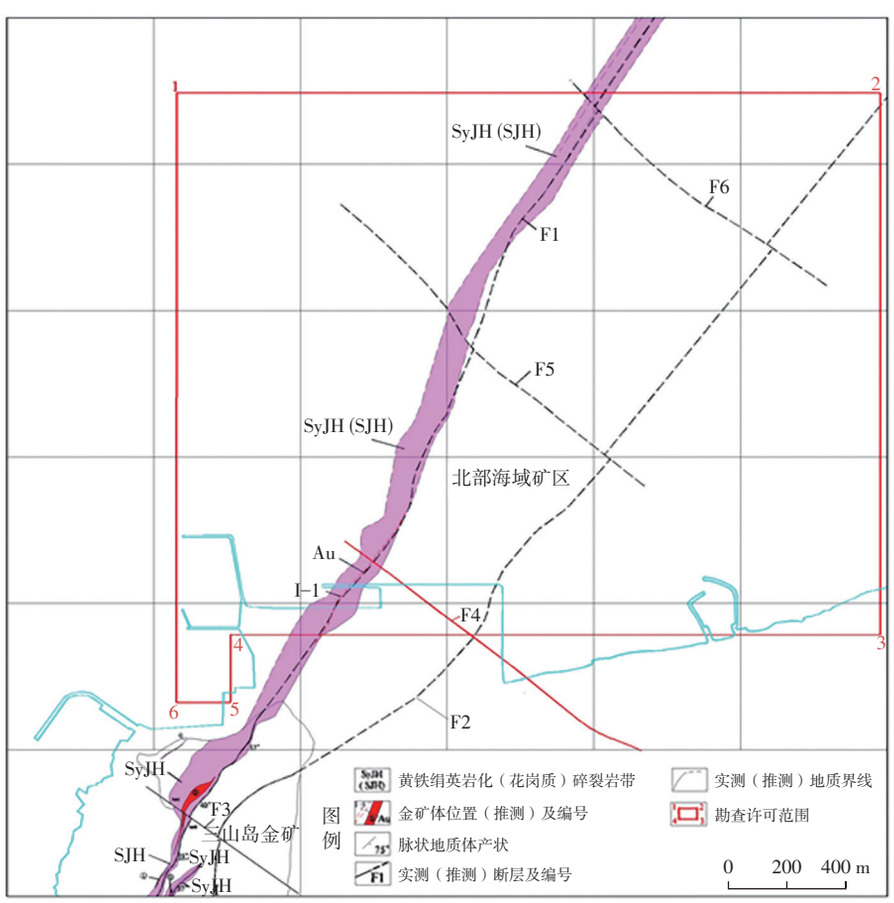


图 2　矿区构造分布位置图

Fig. 2　Structural distribution map of the mining area

TBM巷道TSPwE 连续测量采用冲击锤可控震源＋两组成对三分量检波器滚动观测布设方案，所有几何坐标统一依托隧道掘进里程建立全局坐标系，整套TSP几何布设与空间位置详见图3。

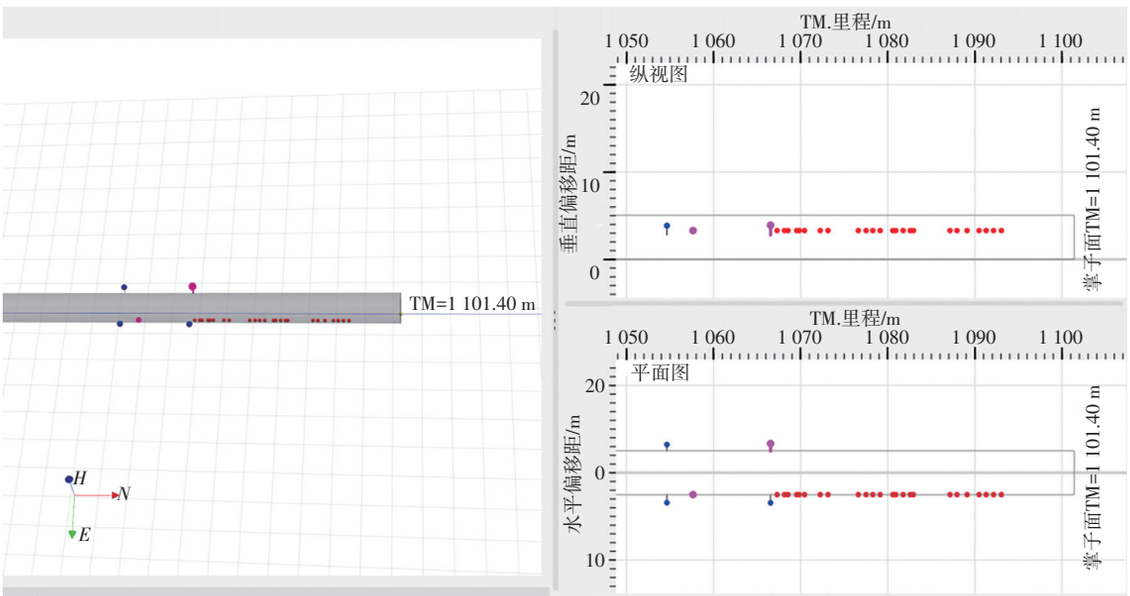


图3　TBM隧道TSP几何布置图：左图中蓝点为接收点，红点为炮点

Fig. 3　Geometric layout of TSP for the TBM tunnel: blue dots represent receivers and red dots denote shot points in the left panel

TSPwE数据处理与解译遵循“原始数据分析-波场分离-速度反演-异常识别等流程。首先对原始地震记录开展质量评价与预处理：通过频谱分析确定有效信号频带，带通滤波压制随机噪声与机械干扰，利用多次锤击的相干叠加提高信噪比；经三分量极化分解将地震记录分离为P波与S波波场，以初始参考速度为反演初值，在滚动窗口重叠约束下建立跨批次平滑正则化全局目标函数，求解三维P波、S波速度场及动态杨氏模量、剪切模量等岩体力学参数。

图4表明，本次地震信号频率集中分布于230～850 Hz的中频段，与沿断裂及块状花岗岩区的岩体条件密切相关，而均质花岗岩区的地震波频率通常大于1 000 Hz。参考范围内围岩相对破碎且局部破碎程度存在变化，为适应隧道围岩结构特征、提高空间分辨率，通常推荐采用高频数据；频带特征表明，裂隙岩体对地震波高频成分吸收衰减作用显著，有效信号集中于中频段；X、Y、Z三分量谱形差异反映波场极化特征，为后续P/S波分离提供了依据。针对破碎围岩引起的信号衰减，处理中采用带通滤波与相干叠加提升信噪比。

图5为从P波速度三维模型中提取的沿地震轴线的纵向及平面二维剖面，模型以轴线为中心，范围覆盖 TM1＋053～TM1＋220。模型内Vp整体介于4 600～6 200 m/s(参考值5 230 m/s)，所选二维平面内为4 800～5 830 m/s。沿隧道轴线，Vp在TM1＋135～1＋140、TM1＋155～1＋162及TM1＋173～1＋187处较沿地震布设线测得的参考值明显降低，掌子面前方TM1＋101～1＋110亦呈低速响应。速度降

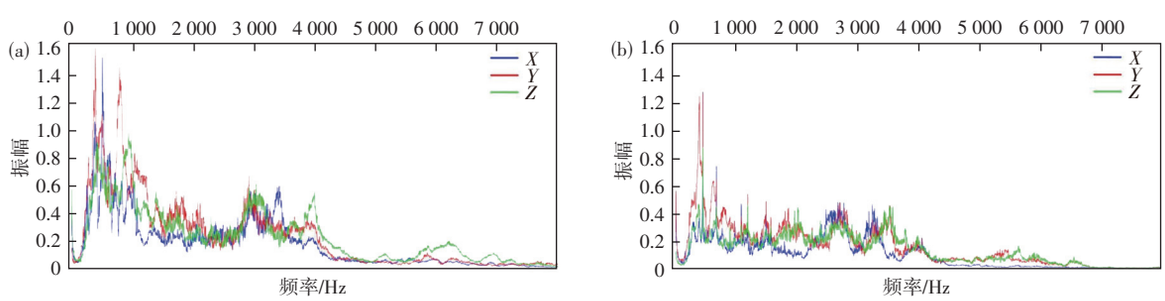


图4　地震波原始信号频谱图：(a)、(b)为同侧接收器，并和炮孔同侧

Fig. 4　Spectrogram of raw seismic signals: plot (a) and plot (b) correspond to receivers on the same side, consistent with the side of shot holes

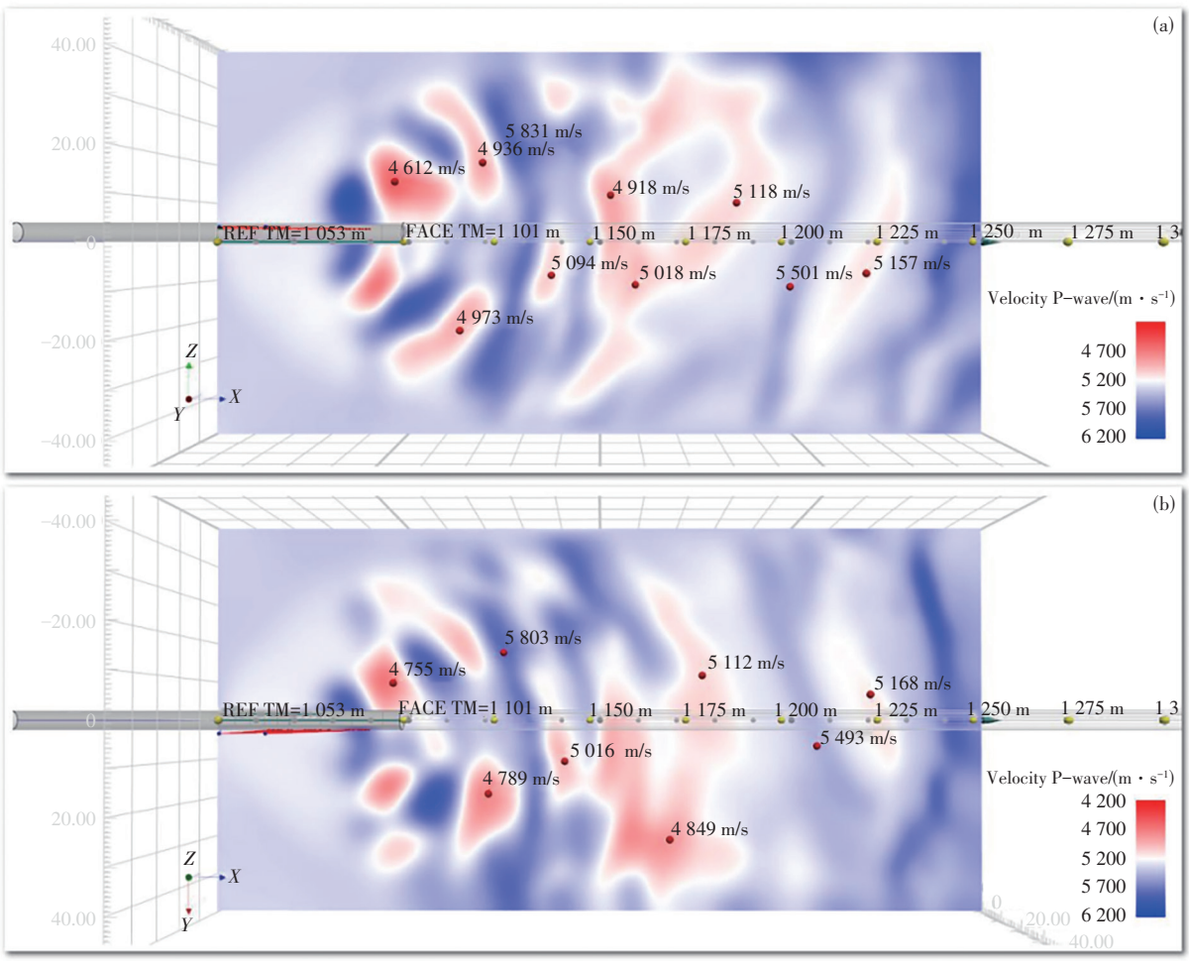


图 5　沿地震轴的三维 P 波速度模型的纵向(a)和平面(b)二维视图，包括隧道模型、震源点位置(红点)以及接收器位置(蓝点)

Fig. 5　Longitudinal view (a) and planar view (b) of the 3D P-wave velocity model along the seismic survey line, including the tunnel model, shot points (red dots) and receivers (blue dots)

低通常对应裂隙增多、断层或剪切带等不利地质结构。这些低速异常与裂隙发育、岩体刚度降低的工程地质特征相符：TM1＋101～TM1＋110 位于掌子面前方，其低速响应提示掘进即将进入节理裂隙相对发育区段，应提前调整掘进参数并加强支护；TM1＋135～TM1＋140、TM1＋155～TM1＋162 及 TM1＋173～TM1＋187 的带状低速异常可能与区域断裂影响带或岩体蚀变有关，需结合 S 波速度与力学参数进一步判释。

图 6 为从 S 波速度三维模型中提取的沿地震轴线的纵向及平面二维剖面，模型内 Vs 介于 2 250～3 500 m/s(参考值 3 220 m/s)，所选二维平面内为 2 830～3 330 m/s。除掌子面前方 TM1＋101～1＋110 区段外，沿隧道轴线另见两个低速区，分别位于 TM1＋150～1＋163 与 TM1＋173～1＋187，近垂直贯穿模型，与 P 波模型中的速度降低区域基本重合，可能与岩体刚度降低有关。图 7 为 Vp 曲面渲染图，渲染的低速区对应速度低于 5 116 m/s，可能与岩体裂隙发育程度增加相关。S 波对裂隙充填物与含水状态较 P 波更为敏感，两处低速带与 P 波模型低速区重合且贯穿模型垂向范围，符合构造破碎带的响应特征；结合 Vp/Vs 比值与动态弹性模量判释，可进一步区分岩体刚度下降与含水异常。

本次工作原始数据以中等频率成分为主，受测线沿线裂隙岩体影响较大；经数字滤波与相干叠加处理后，随机噪声被有效去除，有效信号频带内信噪比明显提升，速度模型的横向连续性与纵向分辨率满足工程判释要求。参考速度(Vp=5229 m/s，Vs=3023 m/s)依据炮点间部分岩体条件较差的区段进行了调整，后续作业的测量成果可在此基础上进一步修正参考速度、改善预测结果。速度分析结果显示，预测范围内岩体条件不会整体改善，裂隙发育程度呈高低交替变化；TM1＋132～TM1＋153 与 TM1＋180～TM1＋185 区段可能出现岩体刚度下降。

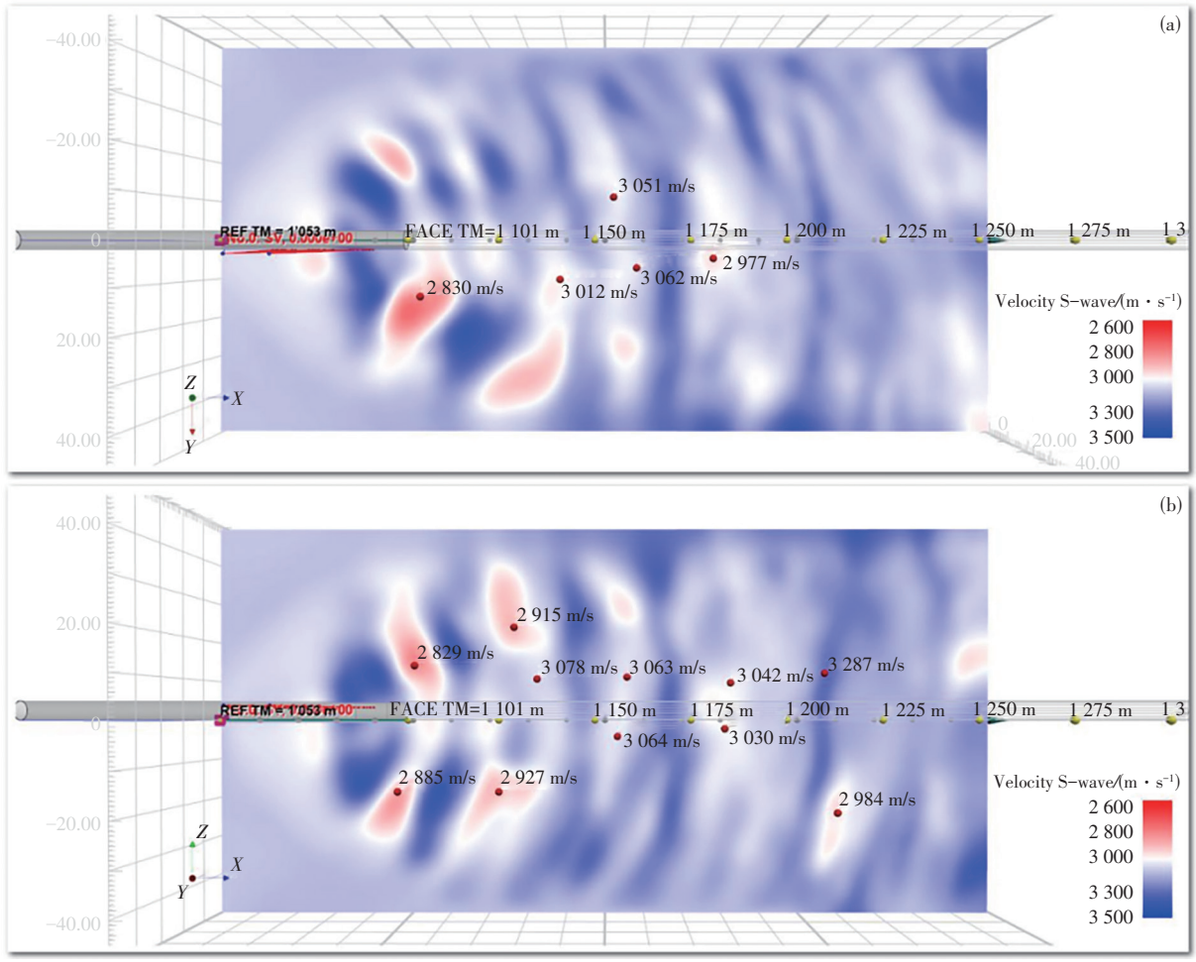


图6 沿地震轴的三维S波速度模型的纵向视图(a)和平面视图(b),包括隧道模型,震源点位置(红点)和接收器位置(蓝点)

Fig. 6 Longitudinal view (a) and planar view (b) of the 3D S-wave velocity model along the seismic survey line, including the tunnel model, shot points (red dots) and receivers (blue dots)

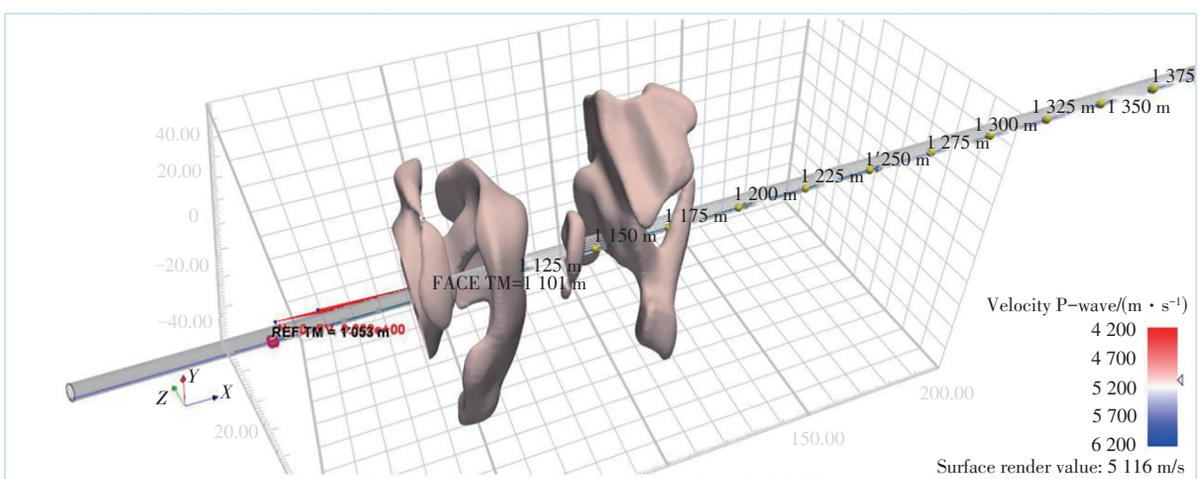


图7 三维Vp视图,表面渲染显示主要低速区域(渲染值=5 116 m/s)

Fig. 7 3D Vp visualization with surface rendering highlighting major low-velocity zones (rendering threshold=5 116 m/s)

为检验预报成果的可靠性，将预测结果与现场实际开挖揭露情况对照，详见图 8。从整体围岩状况、重点异常区段、一致性、风险防控四个方面验证。

1）整体围岩状况验证。该实测区段总体围岩以花岗岩为主，局部夹杂煌斑岩夹层，受高地应力影响节理裂隙普遍发育；掘进揭露后塌方、掉块现象严重，盾尾排险清危工作量大，局部围岩等级到Ⅳ～Ⅴ类，且隧道右侧围岩破碎程度明显大于左侧，与整个预测范围内岩体裂隙发育倾向高低交替变化、岩体条件不会整体改善”的预测结论总体一致。

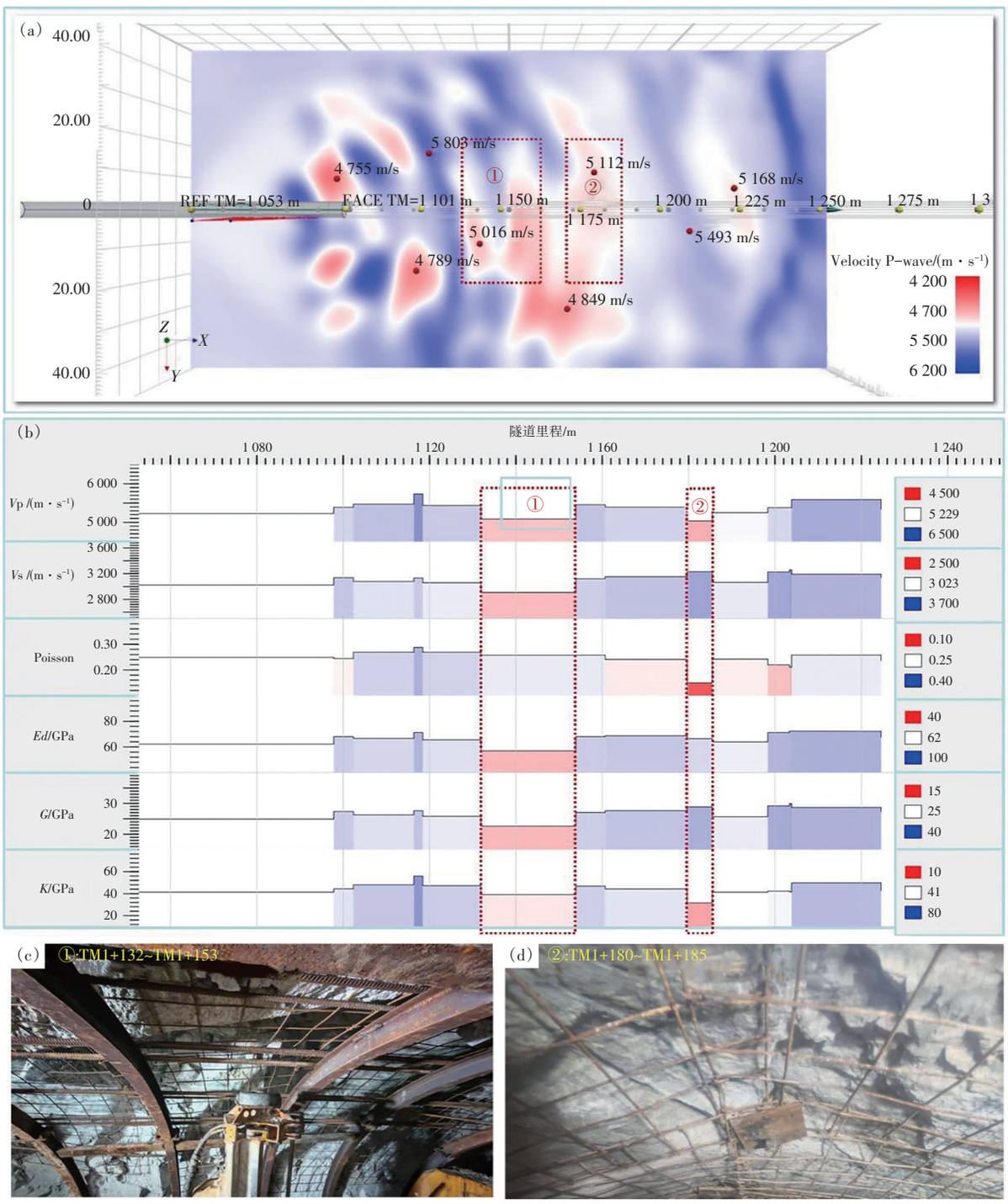


图 8　现场开挖揭露：(a)P 波二维视图；(b)岩石物性参数结果；(c)TM1+132~TM1+153 区域揭露结果；(d)TM1+180~TM1+185 区域揭露结果

Fig. 8　Excavation revealed: (a) 2D view of P-waves; (b)Results of rock physical parameters; (c)TM1+132~TM1+153 excavate results; (d)TM1+180 to TM1+185 excavate results

2)重点异常区段验证。预测指出TM1+132～TM1+153、TM1+180～TM1+185区段岩体刚度可能下降、裂隙发育程度增高；实际掘进至相应里程时，上述区段揭露的围岩破碎程度与掉块频次明显高于相邻区段，围岩等级与预测基本一致。

3)一致性验证。同一布设区域后续作业的TSP测量结果与本次连续测量成果吻合度较高，速度异常区带的位置与形态基本一致，表明TSPwE 预报成果具有良好的可重复性与稳定性。

4)风险防控验证。基于连续预报成果，施工单位对预测的高风险区段提前实施支护加强与掘进参数优化，并在掘进临近F1断裂带前布设专项超前钻探、制定穿越应急预案；现场施工记录表明，掘进揭露过程中未发生突泥涌水事故，连续超前预报为深部矿山TBM安全掘进与风险防控提供了有效支撑。

3 总结

TSPwE连续测量技术专为TBM掘进场景开发，气动冲击锤无爆破震源、循环同步采集模式可完美适配TBM巷道，解决传统间断TSP停机、安全、预报盲区三大核心短板。

实测应用证明该系统可稳定预报掌子面前方120 m范围断层、软弱夹层、含水破碎区，通过P/S波速、动态杨氏模量等参数可精准圈定危险围岩。地质解译成果可直接用于TBM掘进参数、支护方案动态调整。相比传统炸药式间歇TSP，TSPwE具备不占用掘进工期、全程连续成像、无爆破风险、几何数据自动耦合、定量岩体参数输出五大突出优越性，在深部金属矿山长距离TBM开拓工程具备极高推广价值。

参 考 文 献

[1] 荆留杰，张娜，杨晨. TBM及其施工技术在中国的发展与趋势[J]. 隧道建设，2016，36(3)：331-337.
Jing Liujie，Zhang Na，Yang Chen. Development of TBM and its construction technologies in China[J]. Tunnel Construction，2016，36(3)：331-337.

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报，2015，28(5)：1-65.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research：2015[J]. China Journal of Highway and Transport，2015，28(5)：1-65.

[3] Thomas D. Theoretical and applied case studies of seismic imaging in tunnelling[J]. Geomechanik und Tunnelbau，2008，1(5)：436-441.

[4] Ashida Y，Sassa K. Depth transform of seismic data by use of equi-travel time planes[J]. Exploration Geophysics，1993，24(3/4)：341-346.

[5] 董晋. 复杂地质富水隧道综合超前地质预报技术研究[J]. 工程地球物理学报，2021，18(5)：634-641.
Dong Jin. Application of comprehensive advanced geological prediction in advanced detection of water-bearing geological structuresin complex tunnels[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics，2021，18(5)：634-641.

[6] Dickmann T，Sander B. Drivage-concurrent tunnel seismic prediction(TSP)[J]. Felsbau，1996，14(6)：406-411.

[7] Ashida Y. Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2001，38(6)：823-831.

[8] Bohlen T，Lorang U，Rabbel W，et al. Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face：from 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration[J]. Geophysics，2007，72(6)：T67-T79.