

隧道施工中TSP超前地质预测预报技术

邹彦龙

宁夏天宏爆破有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 复杂地层会对隧道施工造成诸多阻碍,借助超前地质预报能够有效规避各类地质隐患,隧道地震探测凭借较强抗干扰性,常被用于隧道地质探查,文章梳理其运作原理与施工流程,分析实际应用成效,指出现存不足,该方法虽可摸清掌子面前方地质状况,却易受地层、设备及人为条件影响,还需不断优化来适配多样施工场景。

关键词: 隧道施工; TSP技术; 超前地质预报; 地震波; 围岩判别

引言: 隧道所处地质环境较为复杂,施工期间常会遇到断层、溶洞以及地下水等不利地质情况,坍塌、涌水这类安全事故也容易出现,会对现场施工造成不小隐患,超前地质探测可有效防控此类风险,隧道地震探测较为适用于现场施工,文中阐述其运作原理、实施步骤与实际运用情况,也梳理出现存不足,能为实际施工运用与技术改良提供基础依据。

1 TSP超前地质预测预报技术基础概述

TSP全称为隧道地震探测法,是适配隧道密闭施工空间的地震反射类物探技术,核心依托地震波传播、反射、折射物理特性完成地质探测。TSP(Tunnel Seismic Prediction)法利用弹性波在岩石中传播时,遇到断层、裂隙或不同岩性界面时会发生反射的原理(如图1所示)。当岩体密度或波速发生变化(即存在波阻抗差异)时,地震波会产生反射信号。通过接收和分析这些信号,可以推断前方地质体的性质、位置和规模。地震波在均匀岩体中的传播方程为:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

其中, v_p : 纵波速度, E : 为弹性模量, ν 为泊松比, ρ 为密度。当岩体存在界面或异常时,速度或密度的突变会导致反射波的生成。

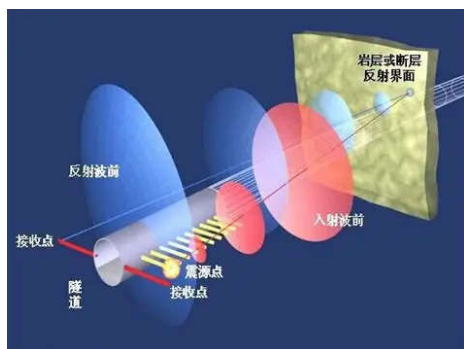


图1 TSP超前地质预测预报基本原理

开展TSP隧道超前地质探测时,需要布置激发点位,一般布设23处,同时搭配两台接收装置,相关布设形式可见图2,整套观测方案的具体参数可参考表1。

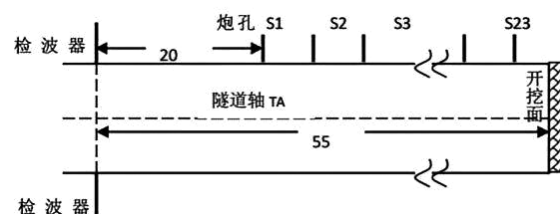


图2 TSP超前地质预报的观测系统

表1 TSP隧道超前地质预报观测系统设计参数

设计参数	接收孔	炮孔
数量	2个, 隧道左、右边墙各1个	23个, 位于隧道右边墙
直径	φ42 ~ 45mm 钻头钻孔	φ32 ~ 38mm 钻头钻孔
深度	2m	1.5 m
定向	垂直隧道轴向, 上倾5 ~ 10°	垂直隧道轴向, 下倾10 ~ 20°
高度	离隧底高1.5m	离隧底高1.5m
位置	距离开挖面55m	第1个炮点离同侧检波器20m, 炮点距大致为1.5m

现场数据采集所使用的设备是瑞典Amberg技术公司的TSP203plus超前预报数据采集系统, 另外, 还有三分量加速度地震检波器、断路触发器(WBT)、触发计时线、启爆线, 以及启爆器等配套的相关超前预报设备。现场数据采集的工作流程具体如下: (1) 测量观测系统参数, 如最小偏移距、炮间距、炮孔高度, 以及最小炮面距等等; (2) 对所有使用的雷管均要进行导线闭合连接处理, 以便于连接断路触发器; (3) 将处理后的雷管与少量炸药捆绑, 装入每个炮孔之中, 并用锚固剂或灌水方式堵住炮孔。其中, 炸药一般选择防水乳化炸药, 炸药量范围50~200g; (4) 安装接收器, 连接主机设备, 设置采集参数, 并测试仪器的数据采集状态是否正常; (5) 逐个放炮, 接收和保存数据^[1]。

2 TSP 超前地质预测预报技术工作流程

2.1 探测前期准备

开展TSP探测工作前做好前期准备,能够顺利推进现场探测施工,也可以有效提升原始波形数据的采集质量,该项准备工作主要分为现场实地考察、仪器设备调试以及探测点位布置三部分。工作人员进行场地勘察时,要查看探测路段隧道边墙的围岩实际情况,清理干净作业区域内松动石块与各类施工杂物,防止掉落石块损伤探测仪器,还要划定专用施工区域,阻隔现场施工产生的震动,降低外界杂波对探测地震信号造成的干扰。相关人员调试设备时,逐一检查震源激发部件、信号接收仪器以及数据传输线路,合理调整信号接收灵敏度,及时排查线路故障与信号传输问题,保证设备可以正常运转。布设探测点位时依照均匀对称的布设要求,结合隧道实际断面规格确定打孔位置,规范管控钻孔各项参数,降低点位布设偏差,改善地震波传播条件,以此保障后续波形数据采集工作进行顺利。

2.2 野外数据采集

野外数据采集是获取原始地震波形、决定探测数据真实性的核心环节,采集质量直接影响后期地质解析结果。该环节以微型震源激发为主,通过可控能量激发方式产生稳定地震波,震源能量需结合围岩硬度、探测距离合理调控,硬质围岩可适度提升激发能量(加大炸药量),破碎软弱围岩则降低能量,防止强扰动破坏围岩原生结构。检波器采用嵌入式安装方式,将传感元件固定于钻孔内部,保证检波器与围岩紧密贴合,弱化空气介质对波形信号的衰减作用,精准捕捉反射波信号。采集过程中需全程管控环境干扰,暂停爆破、掘进等施工操作,同时连续采集多组原始数据,筛选波形完整、振幅稳定的有效数据,剔除畸变、紊乱的无效波形,保障原始数据的完整性与可靠性^[2]。

2.3 室内数据处理

野外现场采集到的地震原始波形,一般都会混入各类环境干扰信号,还存在波形叠加、信号失真等问题,原始数据信噪比: $SNR = 10\log_{10}(PS/PN)$ 偏低,不能直接用来判断地质情况,工作人员可使用TSPwin处理软件对数据做全面梳理加工,开展处理工作时,首先工作人员会整理原始波形,选用适配的滤波手段清除粉尘、设备振动带来的干扰噪音,筛除无效波形,提取有效反射信号,以此改善波形辨识效果;其次结合隧道、钻孔的实际分布校正波形,修正地震波传播过程中的时差与幅值误差,还原波体真实传播路径;接着结合岩体参数构建探测模型,推算波速并完成图像解析,把波形数据转化

为地质剖面图,划分岩层并定位不良地质区域;最后汇总全部检测数据,提取岩体关键参数,为岩层分析与状态判别提供数据依据。(如图3所示)



图3 隧道地震预报3D成果图

核心技术与参数

TSP法的有效性依赖于以下关键技术:

多分量信号解耦:区分纵波(P波)和横波(S波),通过两者的速度比(V_p/V_s)判断岩体含水性或破碎程度。

速度反演算法,可结合传播时差、振幅衰减特征,来还原岩体的速度分布情况,也能借助最小二乘方法,对速度场开展优化处理:

$$\min \sum_{i=1}^n (t_{\text{obs}}^i - t_{\text{cal}}^i)^2$$

其中, t_{obs} 为观测走时, t_{cal} 为计算走时。

动态窗口技术:根据岩体特性动态调整探测深度和分辨率,平衡长距离预报与高精度需求。

地震波反射法探测资料有以下地质判释经验可供参考:反射波振幅越高,反射系数和波阻抗的差别越大;若横波S反射比纵波P强,则表明岩层饱含地下水;比较任何反射振幅必须小心,因为反射振幅易受随机噪音和数据处理的影响; V_p/V_s 有较大的增加或泊松比 ν 突然增大,常常因流体的存在而引起;若 V_p 下降,则表明裂隙密度或孔隙度增加。

(1)关于 V_p/V_s : 1)固结的岩石 $V_p/V_s \leq 2.0$, 泊松比 $\nu < 0.33$; 2)当岩石的孔隙充满水时, V_p/V_s 从1.4-2.0; 3)当岩石的孔隙充满气时, V_p/V_s 从1.3-1.7; 4)水饱和的未固结地层 $V_p/V_s > 2.0$ 。当岩体中含流体时, V_p 与孔隙度和孔隙中流体的性质有关, V_p 会明显降低。 V_s 只与骨架速度有关而与孔隙中流体无关, V_s 不发生明显变化。

(2)土层这类未固结沉积介质泊松比偏高,数值一般能达到0.4以上,岩土孔隙度降低、沉积物逐步固结后,该参数也会随之变小;高孔隙饱和砂岩的泊松比多处在0.3至0.4区间,部分高孔隙饱和砂岩的这项参数也会偏低,甚至可降至0.1。

2.4 地质成果解析

开展地质成果解析,是发挥TSP探测技术实际作用的关键环节,工作人员会结合处理完成的波形数据、成像图像,再搭配岩土力学相关知识来开展地质判断。解析工作分为定性识别、辅助预估两部分,可借助波阻抗界面确定不良地质位置,依靠反射波强弱判断岩体完整状

态,也能依据岩体波速划分围岩类别,分辨岩体密实程度并预估地下水分布,解析时要综合多项参数分析,避

免单用一类数据,以此降低判断失误,得到准确的隧道超前地质预报成果^[3]。(如图4所示)

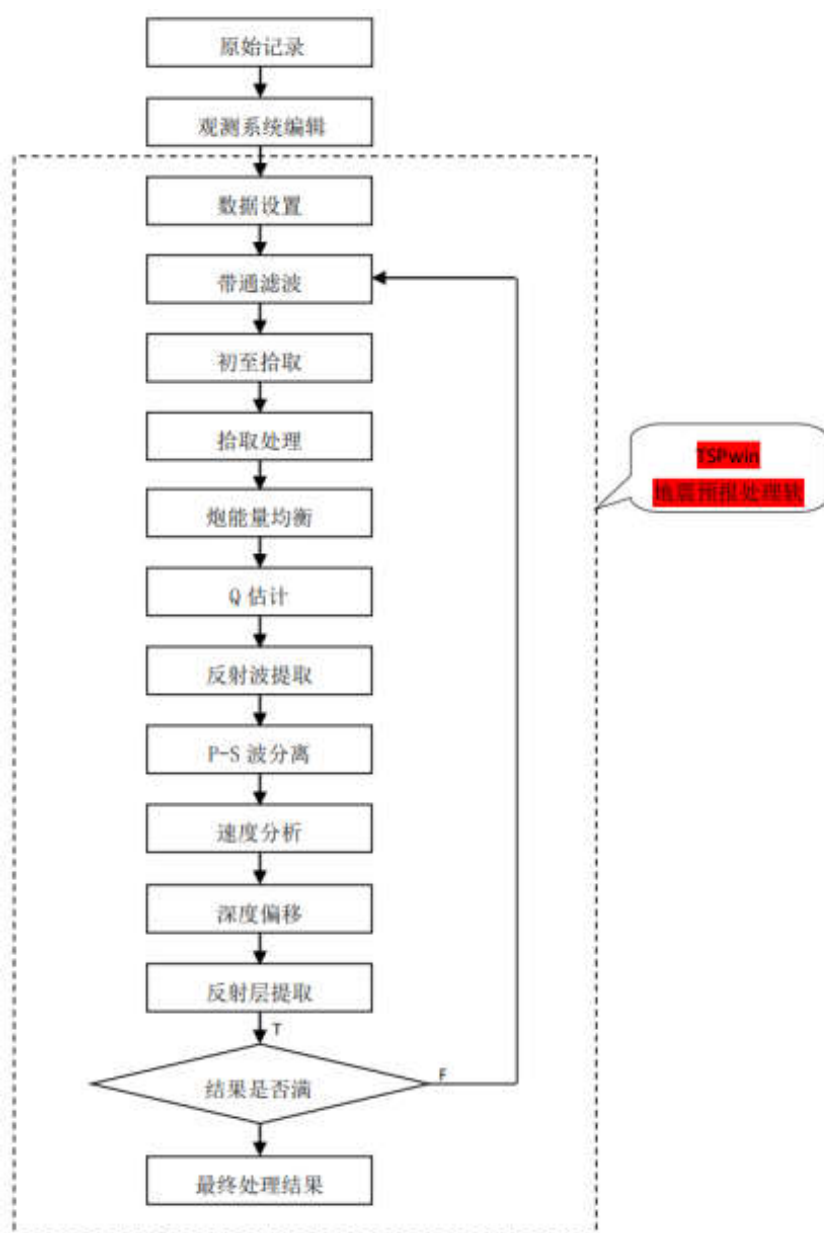


图4 TSP法超前地质预报的数据处理流程

结束语

文章梳理了隧道地震探测相关原理、实施步骤以及实际工程运用,借助地震波相关特征来判定场地地质情况,能够排查不良地质体与地下水发育情况,可为现场施工安全管控提供基础数据,该方法易受环境及自身条件影响,探测精准度尚有不足,往后可改良仪器算法,统一现场操作标准,逐步改善探测效果,进而更好保障隧道项目平稳施工。

参考文献

- [1]雷盼盼.综合超前地质预报与AMT技术在岩溶隧道中的联合应用[J].工程勘察,2026,54(1):91-98.
- [2]李川,谢彬彬,谭涛.TSP-3D超前地质预报在隧道掘进中的应用[J].土木工程,2026,15(1):41-50.
- [3]杨昊.隧道工程超前地质预报技术在实际施工中的应用分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(9):158-161.