

doi: 10.11720/wtyht.2016.1.38

查欣洁, 王伟, 高星. 拟 VSP 与克希霍夫偏移法在隧道超前预报中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 214-219. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.1.38>

Zha X J, Wang W, Gao X. The application of Pseudo VSP method and Kirchhoff migration to the tunnel advanced geological prediction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 214-319. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.1.38>

拟 VSP 与克希霍夫偏移法在隧道超前预报中的应用

查欣洁¹, 王伟², 高星²

(1. 西安科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 通过超前预报技术可以检测掌子面前方的地质构造, 预测隧道开挖过程中的不利地质条件, 从而保障施工进度和施工人员安全。拟 VSP 方法适用于激发点或者接收点在一条直线上, 利用反射波走时曲线与直达波走时曲线的交点推测前方反射界面的位置, 而克希霍夫偏移方法可以是任意观测系统。对垭口隧道的实测数据进行时移校正、滤波、波场分离、拉东变换提取有效反射波等预处理, 对比两种成像结果, 获得掌子面前方构造异常分布, 结果与实际揭露异常相符。应用结果表明, 拟 VSP 方法对巷道正前方构造位置预测准确, 但不能预测构造走向, 克希霍夫偏移方法需要速度扫描获得偏移速度信息, 根据反射波能量确定反射界面, 反射界面与隧道交点为隧道正前方构造位置。两者结合应用可更准确地确定构造走向与位置。

关键词: 超前预报; 波场分离; 拉东变换; 拟 VSP 方法; 克希霍夫偏移

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)01-0214-06

随着我国经济的不断发展, 隧道工程建设得到了越来越多的重视, 而其中最重要的就是隧道施工过程中的安全问题。我国很多地区地质环境较为复杂, 多在造山带内, 破裂带和地下水等地质危害严重, 因而需要采用隧道超前预报技术提前发现隧道开挖过程中的不利地质条件, 预报掌子面前方的地质构造和含水性, 从而保障施工进度和施工人员安全^[1-4]。同时, 超前预报也为隧道施工的方法、支护形式的变更提供了重要依据, 减少了施工的盲目性^[5-7]。因此, 超前预报在隧道施工中具有重大意义。

超前预报是以不同产状地质界面的弹性波传播特征, 尤其是典型灾害地质体的弹性波特征为基础, 通过分析和处理检波器接收到的反射波, 结合相关理论和处理方法计算产生反射波的地质界面的空间位置以及界面间岩土体的弹性波速度参数, 据此反演出前方工作面的地质特征, 实现隧道施工地质超前预报目的^[8-9]。

地震反射法是工程物探中的主要方法之一, 此

外还有探地雷达方法和瞬变电磁预报法, 其中瞬变电磁预报法应用较少, 主要应用于预报含水溶洞型异常探测^[10]。隧道内超前预报使用地震反射波法进行探测时, 岩体内各个方向都可能产生反射波, 这就增加了波场处理分析的难度^[11]。为了能有效地使用地震反射法探测隧道开挖面前方的地质信息, 国内外的大量专家学者进行了相关研究, 并逐渐形成了多种具有不同特点的超前预报方法技术, 其中应用最广的是地震反射预报技术, 如负视速度法、陆地声纳法、SHP 水平剖面法、TSP 预报系统和 TRT 地震反射层析成像预报技术^[12-17]。克希霍夫叠前深度偏移方法是 TSP、TRT 等超前预报技术中广泛使用的偏移方法^[18]。

笔者主要介绍拟 VSP 方法与克希霍夫偏移成像技术在超前预报中的应用, 这两种方法有其各自的优缺点: 拟 VSP 方法能够准确预测构造面在隧道轴线方向的位置, 但不能准确预报构造面走向; 克希霍夫深度偏移需要严格的速度模型信息, 然而速度模型信息是不能准确获得的, 所以会有偏差, 且构造

面在隧道轴向位置受到构造反射面的影响,也存在误差,但是该方法能确定构造面走向。笔者对哑口隧道数据进行炮时基校正、滤波处理、波场分离、拉东变换有效波提取等预处理工作,对比这两种方法的结果,利用各自的优点获得掌子面前方构造面位置及走向信息,从而获得可供施工人员参考的预报数据,提高施工准确性,减少盲目性,克服了单一方法的不足。

1 方法原理

在隧道内的震源孔中放入一定量的炸药,炸药爆炸时激发地震波并向前传播,地震波在传播过程中,当遇到地质异常(如断层、含水层、碎裂带等)时会产生反射波,通过布设在工作面壁上的三分量高灵敏度检波器接收这些反射波信号(图 1)。

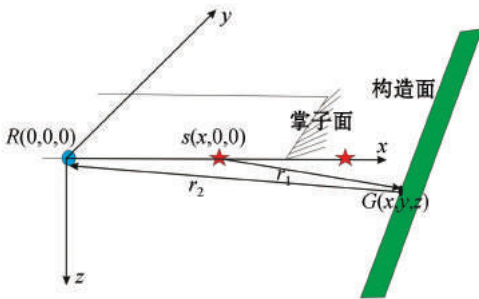


图 1 超前预报工作原理示意

1.1 拟 VSP 方法

根据图 1 观测系统,设检波点位置为 $(0,0,0)$,炮点位置为 $(x,0,0)$,则直达波旅行时方程为

$$t_{\text{arr}} = x/v; \quad (1)$$

反射波旅行时方程为

$$t_{\text{ref}} = (r_1 + r_2)/v. \quad (2)$$

当炮点位置 x 趋于构造面时, $r_1 + r_2 = x$,则反射波与直达波旅行时相同,在地震记录上反射波与直达波同相轴交于一点。当构造面与隧道掘进方向夹角很小时,设检波点到构造面距离为 L ,最小偏移距为 0, $r_1 + r_2 + x \approx 2L$,且直达波斜率

$$k_{\text{arr}} = (L/v)/L = 1/v, \quad (3)$$

反射波斜率

$$k_{\text{ref}} = (L/v - 2L/v)/L = -1/v, \quad (4)$$

反射波与直达波成反八字相交于构造面位置。在实际地震记录中,反射波能量弱,很难从地震记录上观测到反射波同相轴,因此借助式(3)、式(4)对反射波进行校正、水平叠加,提高信噪比。实现方法步骤为:

1) 选择第 k 道为标准道,从第一道开始进行校

正,各道校正量为 $\Delta t = x_j/v - x_k/v; j = 1, \dots, N$ 。校正量为负值,表明时间向上校正;校正量为正值,表明时间向下校正。

2) 将反射波校正到第 k 道旅行时,对各道水平叠加求和 $A_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^N \text{date}_j$,该道为校正后的第 k 道数据。

3) 每一道均作为一次标准道,得到所有求和道数据,此时反射波能量得到加强,覆盖次数与激发炮数一致,反射波同相轴与初始地震记录中直达波同相轴交点为隧道正前方构造面位置。

1.2 克希霍夫偏移

根据单程标量波动方程

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] U = \frac{1}{v^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (5)$$

通过格林函数求解,得到积分公式

$$U(x,y,z;\tau) = \frac{1}{4\pi} \int_A \left\{ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial U}{\partial z} \right] + \frac{\cos\theta}{r^2} [U] + \frac{\cos\theta}{vr} \left[\frac{\partial U}{\partial t} \right] \right\} dA. \quad (6)$$

克希霍夫积分法偏移是建立在克希霍夫积分分解的基础上,将克希霍夫积分中的格林函数用其高频近似解来代替。积分公式中的第一项决定于波场的垂向梯度,第二项为近场源项,这两项在地震偏移中被忽略;第三项中的余弦量为校正因子,对反射波角度进行校正;距离项为球面扩散因子,对波场因传播距离衰减影响进行校正;波场时间导数为相位校正因子,对波场因传播时间引起的相位变化进行校正^[19-20]。

2 实例

2.1 数据采集

在哑口隧道超前探测实验中,采用三分量速度检波器单点接收、多点激发的方式,检波点远离隧道掌子面,24 炮激发,单炮药量 50 g,炮间距 1.5 m,最小炮检距 20 m,0.25 ms 采样,采样长度为 1 024 ms。原始地震记录如图 2 所示,直达波未在同一条直线上,不能识别反射波。

2.2 数据预处理

从记录中可以看出,由于雷管延时或者数据采集仪与爆炸机的不同步,造成直达波同相轴不在同一直线上。笔者利用最小二乘法对每道所拾取的纵波初至拟合,将初至时间校正到一条直线上,有效消除由于延时对数据处理产生的时移误差^[21]。校正后的记录如图 3 所示。

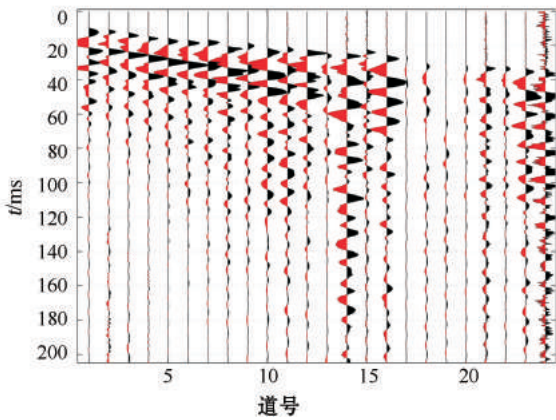


图 2 垭口隧道超前探测实验原始地震记录

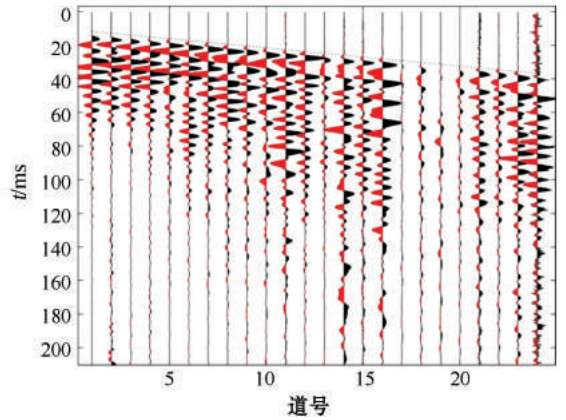
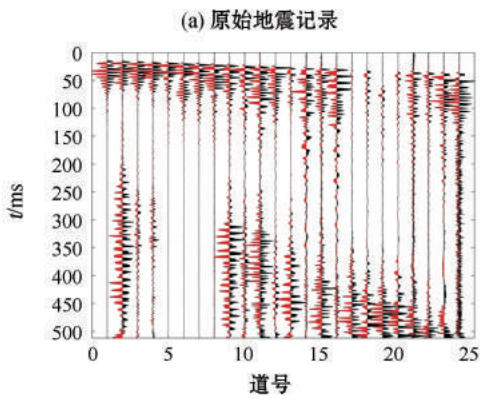
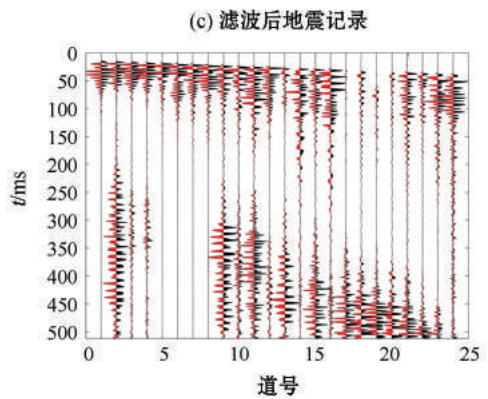


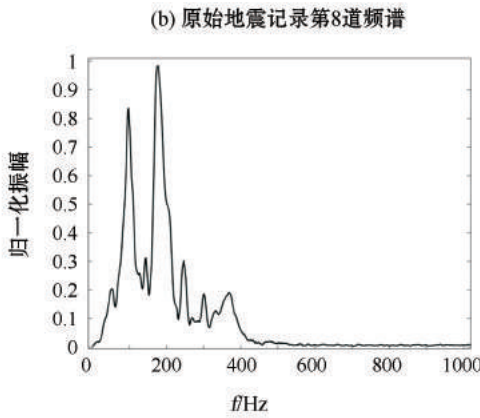
图 3 垭口隧道超前探测实验炮时基校正效果



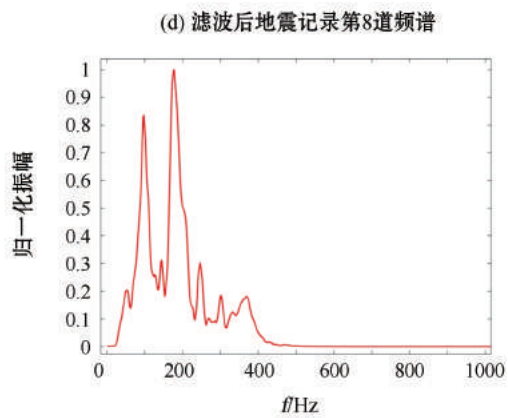
(a) 原始地震记录



(c) 滤波后地震记录



(b) 原始地震记录第8道频谱



(d) 滤波后地震记录第8道频谱

图 4 垭口隧道超前探测实验滤波后记录及频谱

在频谱分析的基础上采用频率域带通滤波压制高频干扰,滤波参数选用 30~450 Hz 带通滤波,滤波前后数据及频谱对比如图 4 所示。可以看出,混叠在原始数据记录中的高频干扰波经滤波处理后受到大幅度抑制,提高了原始数据的信噪比。

2.3 拟 VSP 方法确定构造面位置

按照拟 VSP 方法对滤波后的共接收点数据拾取直达波旅行时,逐道计算校正时差,拉平反射波叠加,提高反射波信噪比,使得反射波同相轴连续且呈直线分布,如图 5 所示。在图 5 中反射波同相轴信

噪比增强,同相轴连线与原始记录直达波连线交点为构造面在隧道正前方位置,检波点为起始点。拟 VSP 结果可以确定掌子面前方 94 m (坐标 56~150 m) 范围内存在 6 个构造面,构造面位于反射波与直达波交点位置。

2.4 克希霍夫偏移

在提取有效反射波过程中,利用 Radon 变换提取有效反射波^[22-23],实现波场分离,用于克希霍夫偏移成像。图 6 是利用拉东正变换与逆变换提取掌子面及后续反射波的过程。在提取的反射波中,只

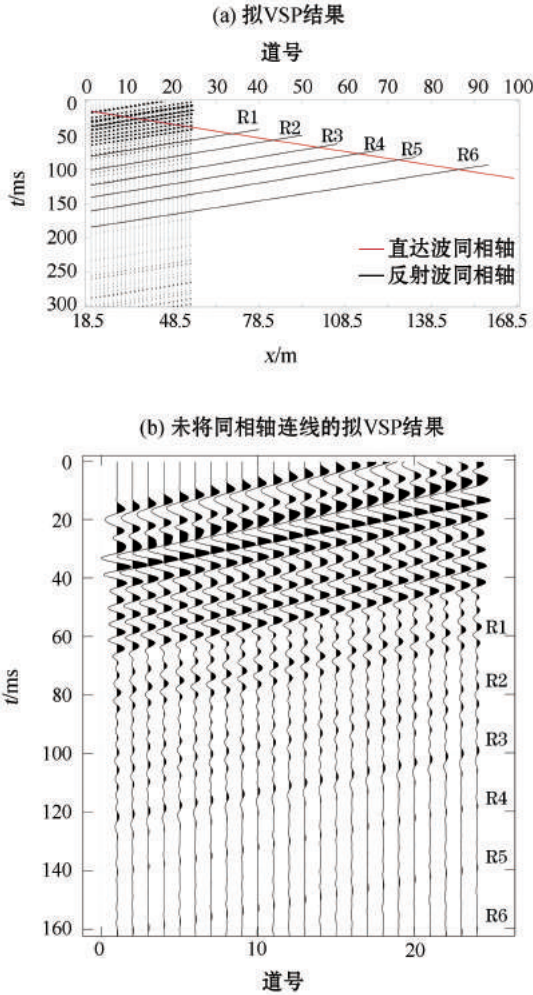


图 5 拟 VSP 方法预测隧道轴向正前方构造面位置

保留了多边形范围内倾角及截距的反射波组。

经计算, 垭口隧道的偏移速度约为 1.77 m/s, 对提取的反射波利用克希霍夫积分偏移方法, 形成最终的偏移成像结果, 如图 7 所示, 红色为正异常, 蓝色为负异常, 以检波点位置为起始位置。

2.5 结果对比

拟 VSP 方法结果(图 4)显示, 在隧道掌子面正

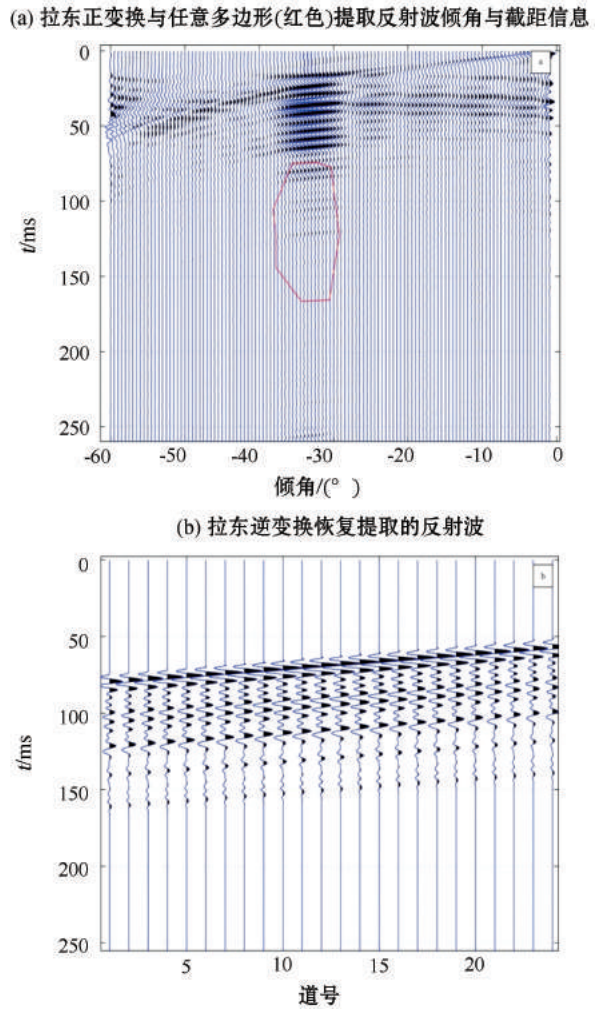


图 6 实测数据的 radon 变换及反射波提取

前方 94m(坐标 56~150m)内存在 6 组反射界面, 反射波信噪比明显提高, 同相轴清晰可见, 反射波同相轴连线与直达波同相轴连线交点横坐标为构造面与隧道轴线相交位置; 反射波组 R1、R3 能量最强, 其他波组相对减弱, 表明构造面 R1、R3 与围岩波阻抗差异大。

克希霍夫偏移方法结果(图 7)显示, 在隧道掌

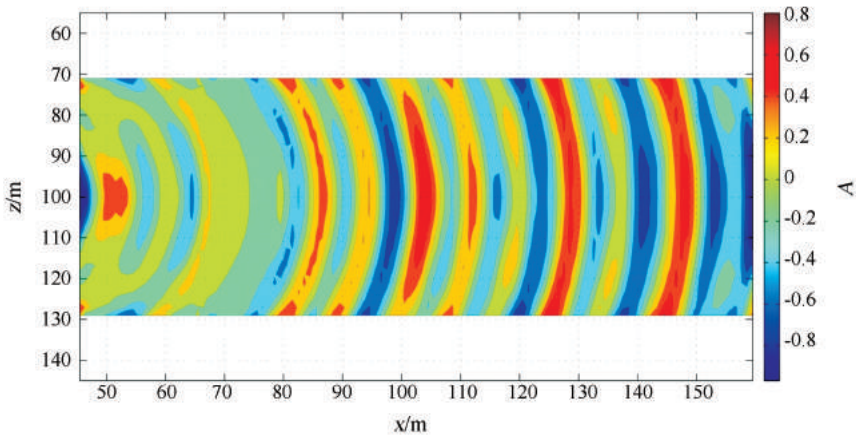


图 7 克希霍夫偏移成像

子面正前方 94 m(坐标 56~150 m)内存在 11 个反射弧,多于拟 VSP 方法预测的结果。该方法将反射面上的反射能量归位到椭球面上,因此反射弧与隧道轴线交点不能准确反映构造面的位置,但是强反射弧段切线方向表示构造面走向。将拟 VSP 方法获

得的构造面位置标在克希霍夫偏移结果中,以圆点表示,过圆点画直线,该直线平行于强反射弧段切线方向,从而获得隧道正前方构造界面走向及位置(图 8)。该解释结果与实际揭露异常相符,有效地指导了进一步的隧道施工,减少了施工的盲目性。

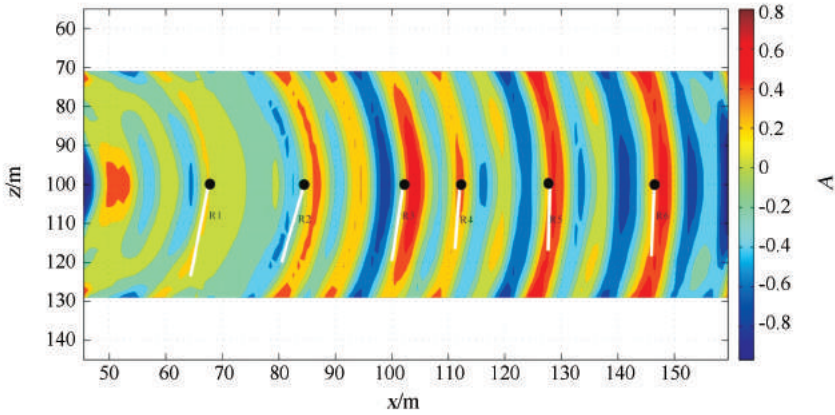


图 8 隧道构造分析结果

3 结论

反射波法隧道超前探测是一个复杂的观测反演系统,在众多的隧道超前探测方法中,复杂观测系统更需要利用偏移成像,但施工条件限制了其应用。在成像方法中以利用地震波动力学特征为主的偏移方法结果更准确,前提是准确提取偏移速度。笔者利用拟 VSP 方法对直达波进行校正,使反射波进行水平叠加,提高信噪比,可以准确获得隧道轴向正前方反射界面位置;利用拉东变换能够提取陡倾角反射界面有效波信息,克希霍夫偏移重构反射面几何形态。此外,反射界面性质及其判断精度还存在一定差距,在今后的研究中还将不断完善。

致谢:成文过程中得到了何振起教授级高级工程师的指导与帮助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 王齐仁.隧道地质灾害超前探测方法研究[D].武汉:中南大学,2007.

[2] 蒋辉,贾超,赵永贵.TST 隧道超前预报技术及应用[J].公路隧道,2013,83(3):59-62.

[3] 王统金,王运生,唐平祥,等.一种三维隧道地质超前预报新方法的研究与应用[J].工程地球物理学报,2014,11(2):147-150.

[4] 肖宽怀.隧道超前预报地球物理方法及应用研究[D].成都:成都理工大学,2012.

[5] 赵永贵.中国工程地球物理研究的进展与未来[J].地球物理学进展,2002,17(2):305-309.

[6] 曾昭璜.隧道地震反射法超前预报[J].地球物理学报,1994,37

(2):268-271.

[7] 汪旭涛,任宽林,胡坚.TSP203 在某公路隧道地质超前预报中的综合应用[J].大地测量与地球动力学,2011,31(S1):102-105.

[8] 李勇,孙喜峰,李廷.隧道施工地质超前预报方法[J].地质与资源,2004,13(2):119-122.

[9] 殷瑞华,徐义贤.TSP-203 在鹰嘴岩隧道超前地质预报中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(3):266-272.

[10] 宁刚.影响隧道超前预报探测距离的因素探讨[J].物探化探计算技术,2014,36(2):228-234.

[11] 常旭,刘伊克,桂志先.反射地震零偏移距逆时偏移方法用于隧道超前预报[J].地球物理学报,2006,49(5):1482-1488.

[12] 何振起,李海,梁彦忠.利用地震反射法进行隧道施工地质超前预报[J].铁道工程学报,2000,68(4):81-85.

[13] 杨果林,杨立伟.隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(4):627-630,645.

[14] 白恒恒.隧道地质超前预报方法的探讨和研究[J].铁道工程学报,2006,95(5):73-76.

[15] 温树林,吴世林.TSP203 在云南元磨高速公路隧道超前地质预报中的应用[J].地球物理学进展,2003,18(3):465-471.

[16] 赵永贵,蒋辉.隧道地震超前预报技术现状分析与新进展[J].公路隧道,2010,69(1):1-7.

[17] 肖书安,吴世林.复杂地质条件下的隧道地质超前探测技术[J].工程地球物理学报,2004,1(2):159-165.

[18] 麻三怀,杨长春,孙福利,等.克希霍夫叠前时间偏移技术在复杂构造带地震资料处理中的应用[J].地球物理学进展,2008,23(3):754-760.

[19] 王棣,王华忠,马在田,等.叠前时间偏移方法综述[J].勘探地球物理学进展,2004,27(5):313-320.

[20] 杨长春,刘兴材,李幼铭,等.地震叠前深度偏移方法流程及应用[J].地球物理学报,1996,39(3):409-415.

[21] 杜立志.隧道施工地质地震波法超前探测技术研究[D].吉林:吉林大学,2008.

[22] 张平松,刘盛东,吴健生.坑道掘进空间反射波超前探测技术 [J],煤炭学报,2010,35(8): 1331 - 1335.

[23] 王朝令.隧道地震超前预报中波场分离与反演方法的数值模拟研究[D].成都:西南交通大学,2012.

The application of Pseudo VSP method and Kirchhoff migration to the tunnel advanced geological prediction

ZHA Xin-Jie¹, WANG Wei², GAO Xing²

(1. College of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The technology of advanced geological prediction can detect the geological structure of the tunnel face and predict the adverse geological conditions so as to ensure the efficiency and safety of the construction. This paper introduces the theory of Pseudo VSP and Kirchhoff migration imaging respectively, and argues that Pseudo VSP, which takes advantage of the intersection of reflection and P-wave arrival time to predict the position of reflection interface ahead, is suitable for the situation that the sources or the receivers are designed on a straight line; however, Kirchhoff migration method can be used in any observation system. This paper is based on the principle of Kirchhoff migration imaging and Pseudo VSP. Taking the Yakou tunnel as an example, the authors compared the imaging results between the two methods through a series of pretreatments, such as time-shift correcting, filtering, wave field separating, and radon transform. The results show that Pseudo VSP can predict the position of construction accurately, but it cannot predict the structural strike. Kirchhoff migration imaging which gets the information of migration velocity by velocity scan method is on the basis of reflected wave energy to determine the reflection interface, and the intersection of reflection interface and tunnel is the position of construction. Combination of Pseudo VSP and Kirchhoff migration imaging can predict the structural strike and position more precisely.

Key words: advanced geological prediction; wavefield separation; radon transform; Pseudo VSP; Kirchhoff migration imaging

作者简介: 查欣洁(1991-),女,在读硕士,现主要从事地震数据处理工作。

通讯作者: 王伟(1972-),男,博士后,助理研究员,主要从事地球物理工作。E-mail: wang_wei@lreis.ac.cn