

文章编号: 1001-1749(2023)01-0008-09

# 隧道三维 Kirchhoff 偏移成像影响因素分析

蔡 盛

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** Kirchhoff 偏移成像是目前最灵活、高效的三维叠前偏移方法,其不受观测系统的限制,计算效率高,不需要很精确的速度模型也能得到较精确的偏移成像结果。在这里采用有限差分法实现了三维复杂介质弹性波场数值模拟,设计有效的三维观测系统并生成模拟数据,进行偏移成像计算,并系统分析了速度模型、走时计算、数据主频、干扰噪声、地质体形态等因素,对偏移成像精度的影响情况。其分析对比结果,对隧道三维 Kirchhoff 偏移成像算法优化与外业施工具有指导意义,有利于提高三维地震反射波法超前地质预报的精度与准确度。

**关键词:** Kirchhoff 偏移成像; 地震波; 地质预报; 影响因素; 数值模拟

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.02

## 0 引言

随着我国地下隧道工程建设的迅速发展,伴随着诸多重大安全和技术难题<sup>[1-4]</sup>。隧道超前地质预报技术是保障隧道掘进安全的重要手段,其中地震反射类超前预报作为长距离预报方法,起着至关重要的作用。常规地震反射波超前地质预报方法虽各有特点,但是多以二维方法为主,受限于自身观测系统限制,检波器组除了接收到来自在掌子面前方不同地质体的反射信号外,还存在各个方向反射回来的干扰信号,信噪比低,导致成像结果准确性不高。三维地震反射波法超前地质预报以其良好的空间属性,能够对掌子面前方不良地质体进行精确定位,是今后地震反射波法的发展方向。

Kirchhoff 偏移成像是目前最灵活、高效的三维超前地质预报叠前偏移方法,由于其具有不受观测系统的限制,对速度模型要求不高,计算效率较高等特点,应用越来越多。前人对隧道地震反射波超前地质预报 Kirchhoff 偏移成像做过大量工作,杜

立志等<sup>[5]</sup>进行了 Kirchhoff 深度偏移在隧道超前预报反射波提取中的应用研究;沈鸿雁等<sup>[6]</sup>对隧道反射地震超前探测偏移成像进行了相关理论和算法研究;朱超等<sup>[7]</sup>进行了三维地震波层析成像技术在隧道超前地质预报中的应用研究;钟谷等<sup>[8]</sup>进行了基于绕射扫描的三维成像系统在地下工程地质灾害预报中的应用研究;查欣洁等<sup>[9]</sup>进行拟 VSP 与克希霍夫偏移法在隧道超前预报中的应用研究;赵云佩等<sup>[10]</sup>进行了基于克希霍夫偏移的槽波超前探测方法及应用研究。由此可见,尽管 Kirchhoff 偏移成像在隧道地质预报中的研究一直在进行,但多以应用研究为主。随着隧道三维地震反射波法超前地质预报技术在生产中应用得越来越广泛,需对 Kirchhoff 三维偏移成像影响因素进行系统全面的对比分析,有利于优化算法,指导现场施工。

## 1 Kirchhoff 偏移成像基本原理

Kirchhoff 偏移成像算法是一种基于绕射求和原理的偏移方法。其理论基础是,在隧道空间一个

收稿日期: 2021-09-29

基金项目: 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目(2019K026); 国铁集团科研开发项目(P2022G054)

第一作者: 蔡盛(1986—),男,硕士,高级工程师,从事工程物探技术应用研究,E-mail: 315234374@qq.com。

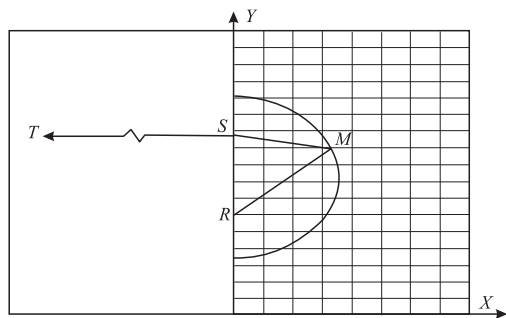


图 1 Kirchhoff 偏移成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Kirchhoff migration imaging

震源点与一个接收点可以确定一个椭圆,即所有到震源点  $S$  与接收点  $R$  的旅行距离为定长的点均可能是反射点  $M$ (图 1)。在隧道需探测的三维空间内,地质反射面的轨迹是观测系统中震源点与接收点的旅行距为定长的点的集合。

以此为理论基础,规定  $X$  为隧道掘进方向的位置, $Y$  为横向或垂向剖面方向的位置, $T$  为地震波传播的旅行时间。将探测空间分成等间距的网格,假设每个网格节点为反射点。根据观测系统中每一对震源点与接收点,以及反射点的位置,即可计算出对应路径的旅行距离,根据给定的波速,即可计算出该路径的旅行时间。依据该震源点接收点的旅行时间,可找到对应数据道集中的瞬时振幅值。在同一网格节点上,将所有震源点与接收点对应地震记录的瞬时振幅叠加在一起。如果该网格节点是地质异常体的反射点,则其叠加的振幅值会出现极大值;如果该网格节点不是地质异常体的反射点,则各道集瞬时振幅不会存在同相轴,其叠加的振幅值会趋近于零。结合倾斜因子、球面扩散因子和子波整形因子的绕射求和偏移方法称为 Kirchhoff 偏移法<sup>[11]</sup>。

## 2 三维超前预报观测系统

根据地震波基本理论,确定三维观测方式设计的基本原则:①充分利用隧道全空间进行观测系统布置,在横向和垂向方向上同时具有较大偏移距,充分地获得空间波场信息;②方便现场实施,能在现场施工环境下较好地完成数据采集,观测方式要有利于进行干扰波的去除。在隧道弹性波超前地质预报中,当用锤击震源在掌子面激发时,沿着隧道掘进方向主要激发纵波;在隧道两侧边墙激发时,沿着隧道掘进方向主要激发横波<sup>[12]</sup>。由于同一隧道模型中

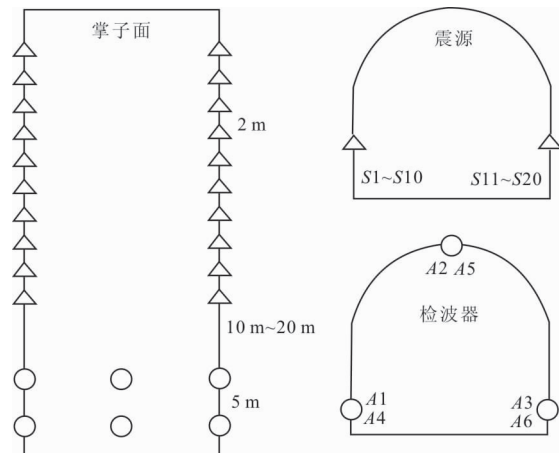


图 2 三维超前探测观测方式

Fig. 2 The observation mode of 3D geological forecast

横波波长较纵波短,因此对地质异常体的分辨率较纵波更高,且横波对水体探测优于纵波信号。根据现场试验,锤击震源的数据主频在 300 Hz 左右,在围岩较完整的情况下,预报距离能达到 120 m 左右,满足现场探测的要求。在此原则下,确定采用锤击震源激发地震横波,采用单分量检波器接收信号,并设计了有利于接收横波的三维观测方式(图 2)。

## 3 成像影响因素分析

三维地震波超前探测的成像精度与多种因素有关,在排除主观因素的前提下,分析多种客观因素对成像精度的影响,为进一步优化、改进方法提供依据。为了便于对比分析,采用有限差分法进行三维复杂介质弹性波场数值模拟<sup>[13]</sup>,采用主频为 150 Hz 的雷克(RICKER)子波作为震源,对不同地质模型的波场进行计算。采用如图 2 所示的观测系统,根据在边墙重锤激发的波场传播基本理论,规定掌子面开挖方向为  $X$  方向,垂直隧道边墙方向为  $Y$  方向,垂直隧底方向为  $Z$  方向。因此单分量检波器在左右边墙时取三分量波场的  $Y$  分量,在拱顶拱底时应取  $Z$  分量,而在掌子面接收应取  $X$  分量,生成模拟数据,进行 Kirchhoff 偏移成像计算,并对三维成果切片进行对比分析。

### 3.1 速度模型对成像精度的影响分析

速度模型主要分为三种,即常速度、层速度、精确速度。常速度即把整个隧道模型空间当作背景波速,层速度即在探测方向平行于掌子面的一定宽度范围内赋予地质体波速,精确速度即按真实的地质

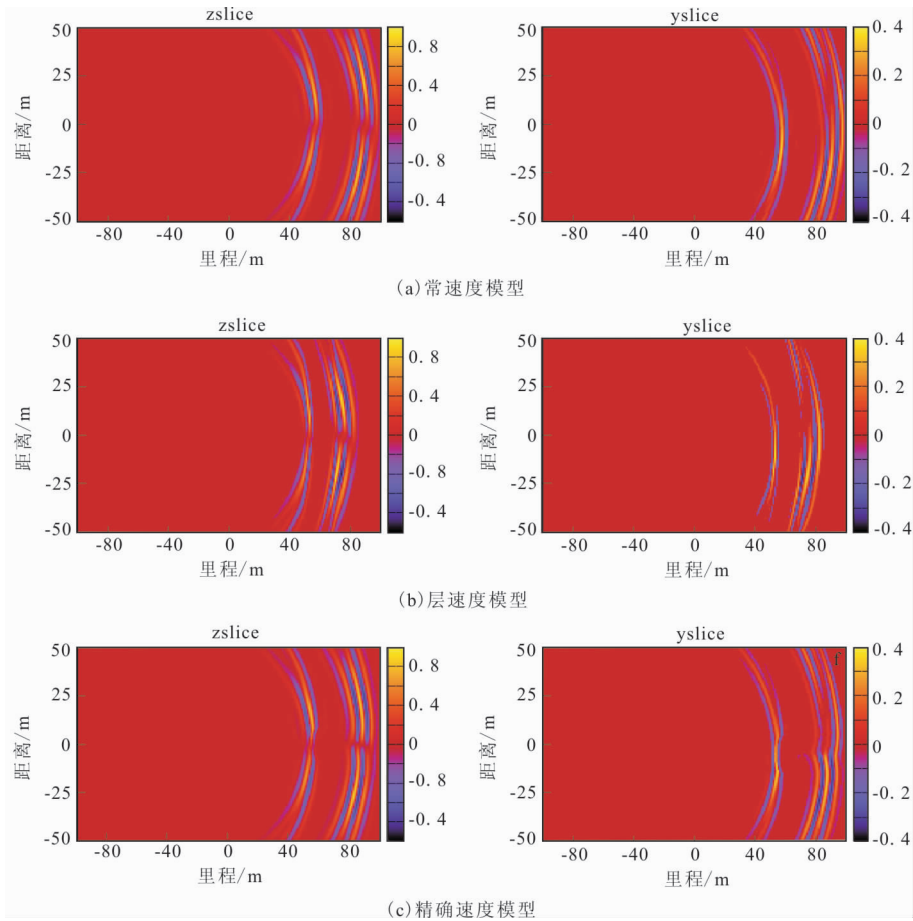


图3 直径  $L=20$  m 球型岩溶不同速度模型成像结果对比  
 Fig. 3 Comparison of imaging results of different velocity models  
 for  $L=20$  m spherical karst

体波速进行计算。准确的速度模型对成像的结果至关重要,现阶段很难获得较精确的速度模型,多数三维成像软件采用常速度进行成像。图3为掌子面正前方50 m球型岩溶模型(直径  $L=20$  m)的成像切片,据此对比分析常速度、层速度、精确速度对于成像结果的影响。

由图3可知,对于常速度偏移成像结果,其异常的后界面位置不准确,那是因为地质异常体内的偏移速度是按背景波速偏移,对于真实的岩溶异常来说,异常体内的真实速度应低于背景波速,所以成像的后界面比实际位置更远。对于层速度来说,成像结果的前后界面位置信息是准确的。而对于精确速度来说,偏移成像的前界面会呈现模拟异常的形态,后界面在地质异常体中心处的位置信息是准确的,但反射弧的位置会有一些的偏差,这是因为地质体外部波速是背景波速的原因。实际应用中,不可能获得精确的速度模型,而获得较准确的层速度模型更有实际意义,对偏移成像的结果很重要,关系到对

地质界面识别的准确性。

### 3.2 走时计算对成像精度的影响分析

走时计算主要分为直线走时和弯曲射线走时。在异常体内的波速模型不精确的情况下,主要是隧道模型空间对走时计算存在影响。由于隧道空间的存在,在隧道壁激发和接收,根据惠更斯原理,地震波沿着隧道壁按最短时间传播,如果采用直线进行计算,理论上会存在一定的误差。快速行进法(FMM)是基于波前面计算的弯曲射线算法,其走时计算更符合实际情况<sup>[14-16]</sup>。对宽度  $D=14$  m的断层模型进行数值模拟,图4为掌子面正前方50 m断层模型(平行掌子面)的成像结果,据此对比分析精确计算走时(FMM)与直线走时计算的成像结果差异。

由图4可知,采用较精确的快速行进法计算的走时与采用直线计算走时,成像结果差异不大,精确计算走时成像结果更加收敛,但在视觉上的差异不明显。

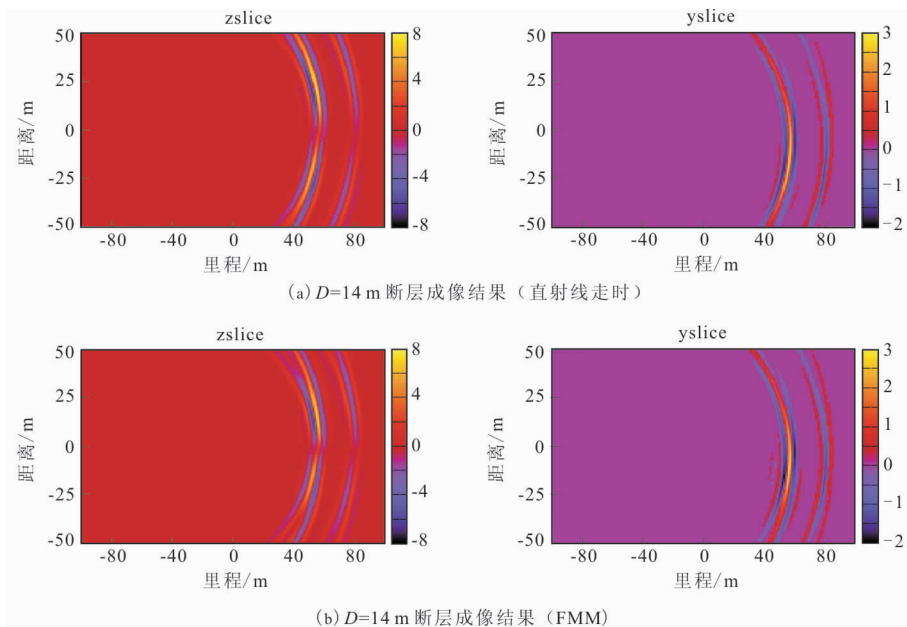


图 4 宽度  $D=14$  m 断层不同走时计算成像结果对比

Fig. 4 Comparison of  $D=14$  m fault imaging results calculated by different travel times calculation methods

### 3.3 数据主频对成像精度的影响分析

采用常规方法在隧道内采集的实际数据主频在  $150\text{ Hz}\sim 300\text{ Hz}$  之间,按  $150\text{ Hz}$  进行计算,假定隧道内围岩背景波速  $V_p=4\ 000\text{ m/s}$ 、 $V_s=2\ 388\text{ m/s}$ ,则其纵波波长为  $26\text{ m}$ ,横波波长为  $16\text{ m}$ 。其波长较隧道洞径、异常体尺寸大得多,成像精度可想而知。为了分析不同主频数据对成像结果的影响,采用  $300\text{ Hz}$ 、 $600\text{ Hz}$ 、 $1\ 000\text{ Hz}$ 、 $2\ 000\text{ Hz}$ 、 $4\ 000\text{ Hz}$  主频的模拟数据进行模拟成像。其模型是位于掌子面正前方  $50\text{ m}$ ,宽度  $D=20\text{ m}$  的断层,平行于掌子面。

由图 5 可知,频率越低成像地质界面越宽,分辨率越低,频率越高成像界面越窄,分辨率越高。另一方面,主频太低时对异常的聚焦作用越弱,反射弧拖尾更长,但是主频较低时反射能量强,频率越高反射能量越弱。对于地质预报来说,长距离预报较低的反射能量可能被干扰噪声掩盖。综上所述,主频在  $1\ 000\text{ Hz}$  左右反射能量较强,聚焦效果也较好。

### 3.4 数据噪声对成像精度的影响分析

在隧道超前地质预报实际生产中,不可能出现绝对安静的情形。隧道内施工环境复杂,超前地质预报的实施常常受到工程局施工的影响,各种人员、施工机械产生的震动严重影响超前地质预报数据的信噪比。为了分析对比不同噪声水平对偏移成像结果的影响,取四分之一横波波长宽度( $D=4\text{ m}$ )的断

层模型,给模拟数据添加最大有效能量的  $1.2$  倍、 $0.9$  倍、 $0.7$  倍、 $0.5$  倍、 $0.3$  倍、 $0.1$  倍的噪声信号,模拟了不同程度的噪声信号对偏移成像的影响情况。图 6 为掌子面正前方  $50\text{ m}$  断层模型(平行掌子面)在不同噪声干扰下的成像结果。

由图 6 可知,由于  $Z=0$  切片的偏移信号强, $Y$  切片的偏移信号弱,在同等噪声水平的情况下, $Y$  切片受干扰影响较大。当噪声水平在  $0.1$  倍最大有效能量时,偏移成像成果基本不受影响, $Z$  切片和  $Y$  切片均能获得较清晰的成像结果;当噪声水平在  $0.5$  倍最大有效能量时, $Z$  切片成像结果基本不受影响,成果切片相对较清晰,而  $Y$  切片成像结果基本淹没在噪声之中;当噪声水平在  $1.2$  倍最大有效能量时,偏移成像成果的  $Z$  切片和  $Y$  切片均很难分辨出有效异常。因此可以认为,噪声水平必须低于  $0.5$  倍有效能量,才能获得较好的偏移成像结果。

### 3.5 地质体形态对成像精度的影响分析

当地震波遇到声学阻抗差异(密度和波速的乘积)界面时,一部分信号被反射回来,一部分信号透射进入前方介质。声学阻抗变化通常发生在地质岩层界面或岩体内不连续界面。反射地震信号被高灵敏地震信号传感器接收,通过分析,被用来了解隧道工作面前方地质体的性质、位置及规模。正常入射到边界的反射系数与透射系数计算公式为式(1)。

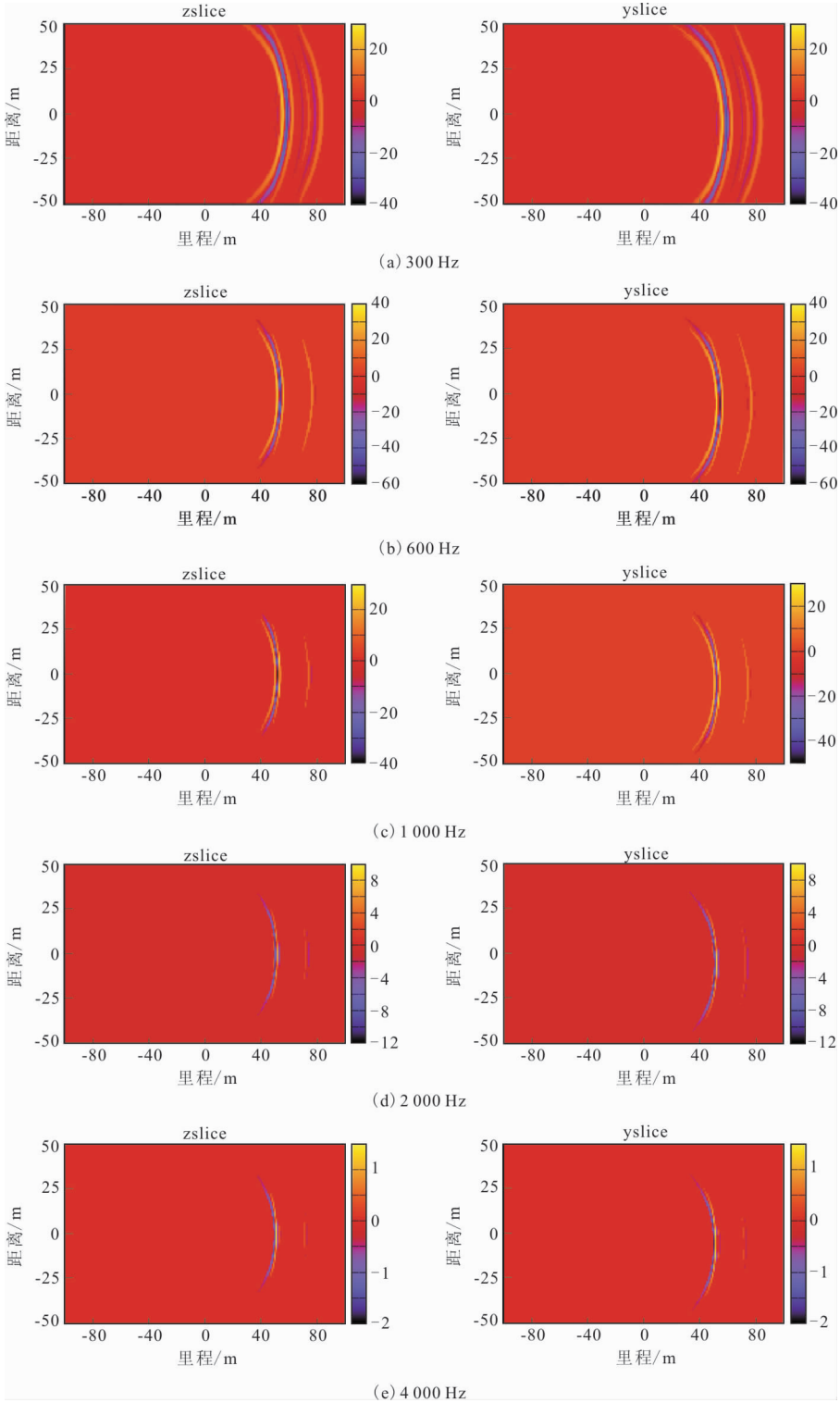


图 5 宽度  $D=20$  m 断层模型不同主频数据成像结果对比  
 Fig. 5 Comparison of  $D=20$  m fault model imaging results of different dominant frequency data

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad T = \frac{2\rho_2 v_2}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1)$$

其中:  $R$  为反射系数;  $T$  为透射系数;  $\rho$  为岩层的密度;  $v$  为地震波在岩层中的传播速度。地震波从一

种低阻抗物质传播到一个高阻抗物质时,反射系数为正;反之,反射系数为负。因此当地震波从软岩传播到硬岩时,回波的偏转极性和波源是一致的。当岩体内部有破裂带时,回波的极性会反转。反射体

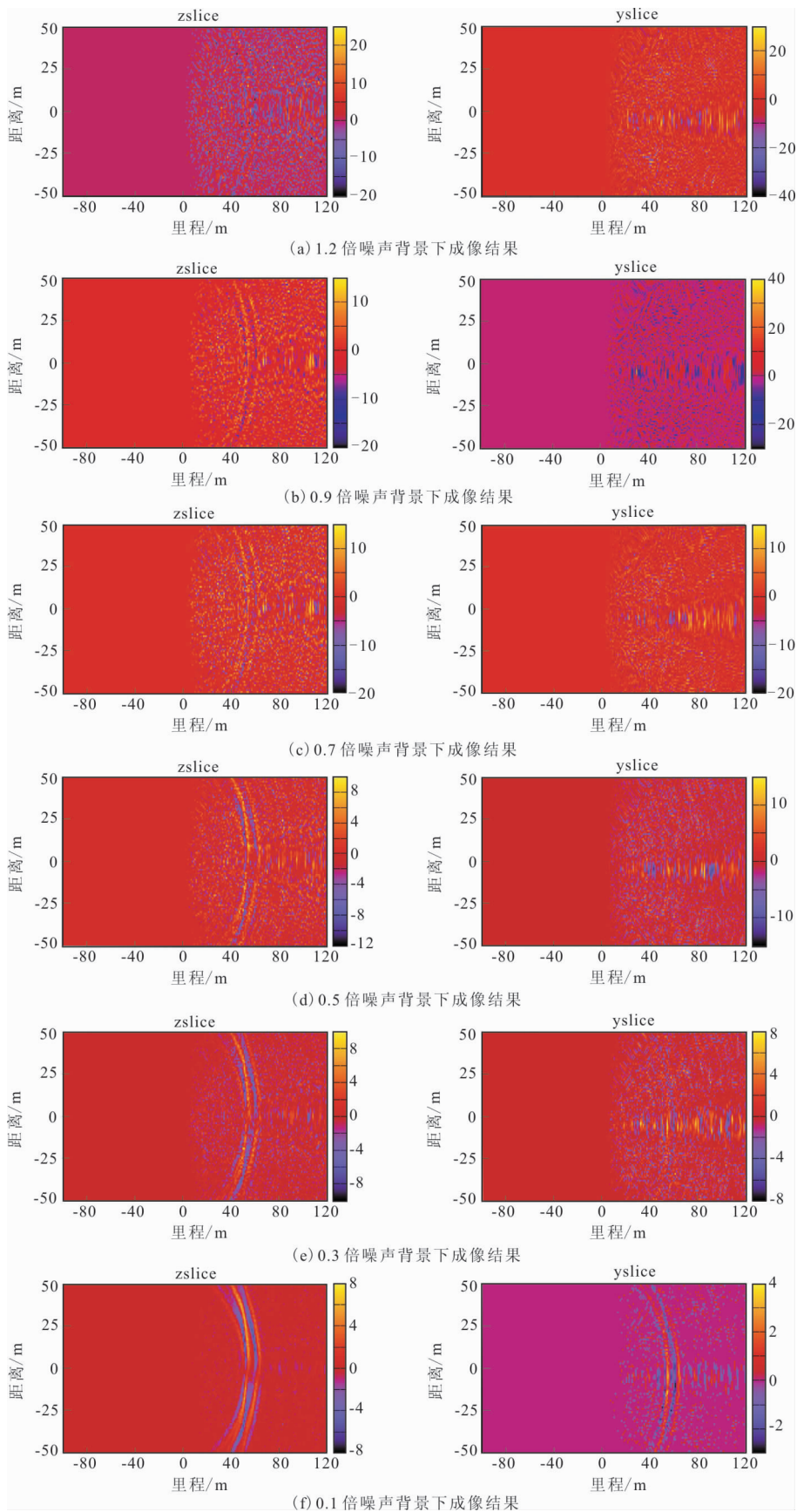


图 6 宽度  $D=4$  m 断层模型不同噪声水平偏移成像结果对比

Fig. 6 Comparison of imaging results of  $D=4$  m fault model at different noise levels

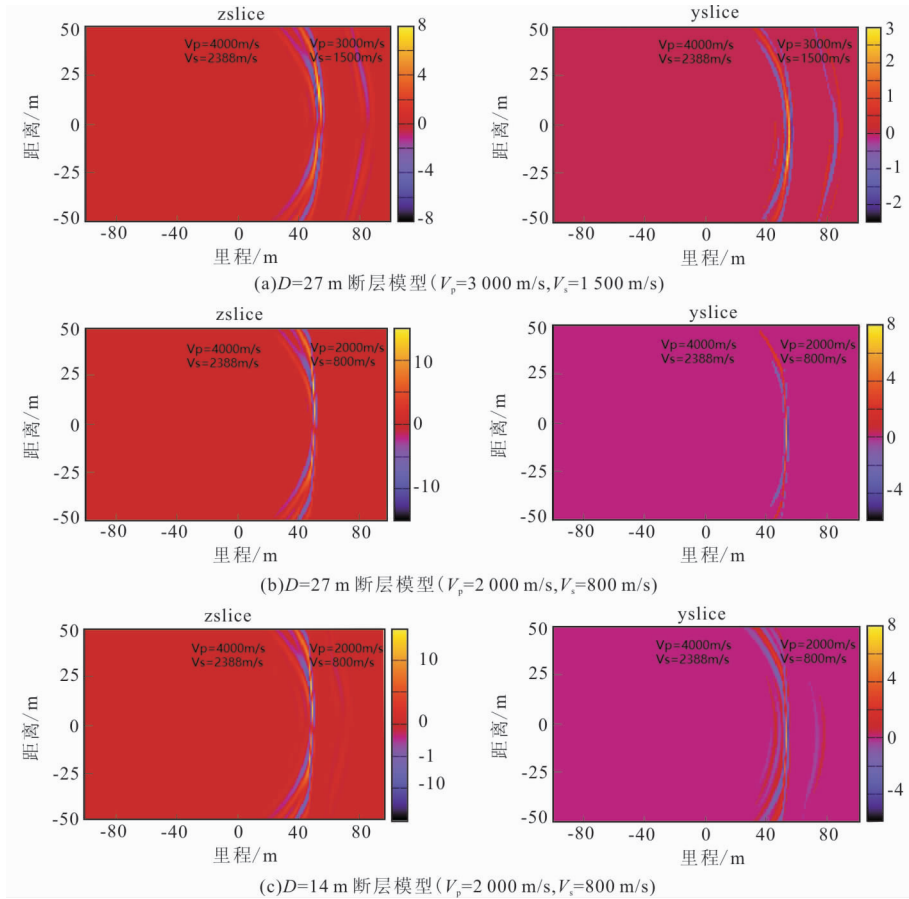


图 7 不同地质体形态偏移成像结果对比

Fig. 7 Comparison of migration imaging results of different geological bodies

的尺寸越大,声阻抗差别越大,回波就越明显,越容易探测到。当异常体的波阻抗 $\rho v$ 越弱时,透射波就越弱,到下一个反射界面时能量也就越弱。为了对比分析地质体形态对成像精度的影响,对不同宽度( $D$ )的地质体进行模拟与成像。

图 7 为掌子面正前方 50 m 断层模型(平行掌子面)成像结果。由图 7 可知,对于宽度为 27 m 的断层,当断层异常体波速为  $V_p=3\ 000\ \text{m/s}$ ,  $V_s=1\ 500\ \text{m/s}$  时,能够较清楚地探测到断层后界面的反射,但是当断层异常体波速为  $V_p=2\ 000\ \text{m/s}$ ,  $V_s=800\ \text{m/s}$  时,不能探测到断层后界面的反射。这是因为透射系数  $T$  变小,透射波变弱,而透射波在断层内不断衰减,到达后界面时的能量很小或者没有了。当断层宽度变为 14 m 时,断层异常体波速为  $V_p=2\ 000\ \text{m/s}$ ,  $V_s=800\ \text{m/s}$  时,又能够探测到断层后界面的反射,这是因为断层宽度变小后,透射波的衰减距离变短,还有少部分能量到达断层后界面。由以上模拟实例可知,地质异常体的规模、大小以及填充的介质,对探测的结果影响较大。当地质异常体

的各地质要素未知的情况下,能达到的成像效果也是未知的。

## 4 结论

通过有限差分法实现了三维复杂介质弹性波场数值模拟,设计有效的三维观测系统并生成模拟数据,对不同地质模型的偏移成像结果进行对比分析,得到以下结论:

1) 经过对比分析速度模型、走时计算、数据主频、干扰噪声、地质体形态对偏移成像结果的影响情况,发现除走时计算外,其余因素均对偏移成像结果影响较大。

2) 速度模型对地质异常后界面的偏移成像结果影响较大,实际生产中多数会导致后界面位置偏远,需尽可能优化算法,得到较精确的层速度模型,有利于提高探测结果的准确性。

3) 较高的数据主频可提高偏移成像的分辨率,但也可能降低反射能量叠加值。实际外业数据主频

偏低,需尽可能地改善激震条件,提高外业数据的主频。

4)外业数据采集时应尽可能加强与现场施工单位的沟通协调,改善现场作业环境,减小震动干扰影响,采用多炮叠加的方式提高外业数据信噪比是可行的。

5)地质体形态为客观地质条件,难以获悉具体信息。实际生产中应根据超前水平钻孔资料对偏移成像结果进行标定,综合分析,相互验证,提高超前地质预报的解译精度。

## 参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945—1956.  
QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945—1956. (In Chinese)
- [2] 王思敬. 中国岩石力学与工程的世纪成就与历史使命[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 867—871.  
WANG S J. Century achievements and new historical mission of rock mechanics and engineering in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 867—871. (In Chinese)
- [3] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, 30(1): 7—9.  
WANG M S. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the Karst district [J]. Railway Investigation and Surveying, 2004, 30(1): 7—9. (In Chinese)
- [4] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(07): 1297—1307.  
LI S C, XUE Y G, ZHANG Q S, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(07): 1297—1307. (In Chinese)
- [5] 杜立志, 殷琨, 牛建军, 等. Kirchhoff 深度偏移在隧道超前预报反射波提取中的应用[J]. 探矿工程, 2008, 35(2): 68—71.  
DU L Z, YIN K, NIU J J, et al. Application of kirchhoff depth migration in tunnel prediction by reflecting wave[J]. Exploration Engineering, 2008, 35(2): 68—71. (In Chinese)
- [6] 沈鸿雁, 李庆春, 冯宏. 隧道反射地震超前探测偏移成

像[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 298—304.

SHEN H Y, LI Q C, FENG H. Migration imaging for tunnel reflected-wave seismic prediction ahead [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 298—304. (In Chinese)

- [7] 朱超, 许兆义, 王晓. 三维地震波层析成像技术在隧道超前地质预报中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 31—34.  
ZHU C, XU Z Y, WANG X. Application of 3D seismic waves tomography technology to geological prediction for tunneling [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4): 31—34. (In Chinese)
- [8] 曹国侯, 王运生, 李耀华, 等. 三维成像系统在地下工程地质灾害预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(z1): 1735—1739.  
CAO G H, WANG Y S, LI Y H, et al. Application of three-dimensional imaging system for forecasting geological disasters in underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(z1): 1735—1739. (In Chinese)
- [9] 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.  
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—219. (In Chinese)
- [10] 赵云佩, 王伟, 侯献华. 基于克希霍夫偏移的槽波超前探测方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 186—182.  
ZHAO Y P, WANG W, HOU X H. Channel wave advanced detection method based on Kirchhoff migration and its application [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 186—182. (In Chinese)
- [11] 渥. 依尔马滋. 地震数据处理[M]. 黄绪德, 袁明德, 译. 北京: 石油工业出版社出版, 1994.  
YILMAZ. Seismic data processing [M]. HUANG X D, YUAN M D, TRANS. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. (In Chinese)
- [12] 李文瑞. 基于 TRT 系统的隧道三维地质构造分析应用及改进方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
LI W R. Research on the analytical application and improvement of three-dimensional geological structure based on TRT system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (In Chinese)
- [13] 鲁光银, 熊瑛, 朱自强. 隧道反射波超前探测有限差分正演模拟与偏移处理[J]. 中南大学学报(自然科学

版), 2011, 42(1): 136—140.

LU G Y, XIONG Y, ZHU Z Q. Detection simulation ahead of tunnel face and reverse-time migration with reflection wave method[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(1): 136—140. (In Chinese)

- [14] 张晓丹, 余翼翀, 张志禹, 等. 旅行时快速步进(FMM)波前追踪算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(5): 19—22.

ZHANG X S, SHE Y C, ZHANG Z Y, et al. Research on fast matching method wave front tracking of traveling time[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(5): 19—22. (In Chinese)

- [15] 丁鹏程, 杨国权, 李振春, 等. 基于三维多模板快速推进算法的复杂近地表射线追踪[J]. 石油物探, 2016, 54

(5): 483—492.

DING P C, YANG G Q, LI Z C, et al. Ray tracing based on 3D multi-stencils fast marching algorithm for complex near-surface model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 54(5): 483—492. (In Chinese)

- [16] 张双杰, 朱培民, 赵仁基, 等. 快速推进法计算精度分析及改进[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(3): 254—265.

ZHANG S J, ZHU P M, ZHAO R J, et al. Analysis on calculation accuracy of fast marching method and its improvement[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(3): 254—265. (In Chinese)

## Analysis of influencing factors about 3-D tunnel Kirchhoff offset imaging

CAI Sheng

(China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd. Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The Kirchhoff offset imaging method is currently the most flexible and efficient three-dimensional laminated offset method, which is not limited by the observation system, has high computational efficiency, and does not require a very accurate speed model to obtain more accurate offset imaging results. In this paper, the finite difference method realizes the three-dimensional numerical simulation of the tunnel seismic wave. We get analog data and calculate offset imaging according to the three-dimensional observation system. On this basis, we thoroughly analyze the speed model, travel-time calculation, data frequency, interference noise, geometric morphology, and other factors and their impact on imaging accuracy. These analysis results can help optimize the three-dimensional kirchhoff offset imaging algorithm and instruct the tunnel's construction. All this can help to improve the accuracy of the three-dimensional superior geological forecast.

**Keywords:** Kirchhoff offset imaging; seismic wave; geological forecast; influencing factors; numerical modeling