



地震全波形反演技术在小保当煤矿三维地质建模中的应用研究

杜少鹏 李志勇 郭曼 徐吉丰

在“采、掘”之前构建采煤工作面透明三维地质模型，实现采煤工作面地质信息透明化，是未来智能化开采发展的必然趋势。煤矿井下复杂和不稳定的工作环境，狭小的作业空间，以及不确定的安全隐患，成为我国煤矿行业面临的重大问题。此外，煤炭开采过程中自动化水平低是影响我国煤炭行业高质量发展的主要原因之一。因此，只有加大煤矿在科学技术方面的应用研究力度，使煤矿实现从机械化到数字化、智能化的发展，才能做到安全、高产、高效、高采出率。实现煤矿综采工作面的智能化开采，提高资源利用率也是煤矿企业的发展方向。

通过物探、钻探等科学技术手段实现工作面内部的透明化，建立工作面三维地质模型，在地面进行模拟采煤，最终实现在地面控制采煤这一创新性的变革，进而推进煤矿的智能化开采，使得煤矿生产更安全、效率更高，并显著提高经济效益和潜在社会效益。

实现采煤工作面的地质透明化需首先查明工作面的地质情况，包括煤层顶（底）板起伏、煤层厚度变化以及断层、陷落柱等地质异常构造。槽波地震勘探技术是目前矿井物探中探测地质构造异常的主要方法之一。然而，槽波地震勘探技术对较小的地质构造难以准确圈定。而地震全波形反演技术具有高精度、高分辨率的特点，能准确判定地质构造三维空间特征，为构建三维地质模型提供精确数据支撑，对提升工作面三维透明化技术水平有积极意义。

传统勘探方法的不足及地震全波形反演技术的优势

传统的槽波地震勘探具有探测距离远、分辨精度高、可利用信息量多、抗电磁干扰能力强、波形特征比较容易识别的优点。槽波是指在煤层内传播的地震波，当采煤工作面有断层、陷落柱等地质异常时，沿煤层传播的槽波会发生反射、折射、散射，通过检波器将接收到的透射槽波和反射槽波记录下来，对数据处理分析后，可判断地质异常的位置规模等。

煤炭智能精准开采需首先精细探明回采工作面的地质构造特征，通过在透明化三维地质模型上进行“数字采矿”的模拟推演，提前规划采煤机的预想截割曲线，以实现地面人员远程操控、井下无人化开采的目标，为煤矿透明化智能化提供数据支撑和技术保障。然而，槽波地震勘探技术主要是实现对构造的成像，不能做到直接识别煤岩的物理或地质性质；对落差小于 1/3 煤厚的断层和厚度变化幅度小于 1/3 煤厚的煤层变薄区，从理论上难以做到准确圈定。

相比而言，地震全波形反演技术则有能力解决小尺度异常成像问题。该技术利用地震资料中的振幅和相位信息重构获得波动方程中所描述的物性参数模型，直接使用介质物性参数（速度、密度）反演，能精细分析煤层顶（底）板起伏变化情况，能有效分析煤层中夹矸三维空间特征，具有准确判定断层、陷落柱、挠曲、采空区等地质构造三维空间特征的优势，为煤矿智能化开采提供技术支持。



基于地震勘探的三维地质建模技术

槽波地震勘探技术

含煤岩系中，通常煤层的密度比上下围岩的密度小，地震波在煤层中传播速度低，煤层是一个明显的低速槽。煤层中激发的地震波，部分能量经煤层顶底板多次全反射，互相叠加干涉，形成槽波。槽波是只在煤层内部传播的地震波，当采煤工作面前方有断层、陷落柱等地质异常时，沿煤层传播的槽波受到阻断。在同一煤层适当巷道煤壁安置检波器，可接收到透射槽波和反射槽波并传送到地震仪记录下来，通过对数据处理分析后，可判断地质异常的位置规模等。槽波的形成原理如图1所示，A区由于地震波的人射角小于临界角，所以部分能量透过顶（底）板向围岩中泄露，另一部分能量反射回煤层内部，称为泄露区；B区和C区入射角大于临界角，地震波在顶（底）板界面上被全反射回煤层之中，反射回煤层中的地震波在C区内相互叠加干涉形成槽波。

槽波地震勘探技术是利用在煤层中激发、形成和传播的槽波所携带的地质信息来探查测区内的煤层厚度变化、矸石层分布、断层、陷落柱和采空区等各种异常体的一种地球物理勘探方法。根据勘探目的与布置方式不同，槽波地震勘探技术分为透射槽波法、反射槽波法。透射槽波法是在工作面的不

同巷道布置震源点和检波器，当工作面一侧的震源点被激发产生震动时，能量穿过煤层被对面巷道的检波器所接收记录；反射槽波法是在同一条巷道中布置震源点和检波点，接收穿过测区的反射槽波信号，根据是否接收到反射槽波，确认前方是否存在煤层的不连续性。

地震全波形反演技术

全波形反演能够精细反映三维地质构造。全波形反演是一种高精度、高分辨率的井下介质物性（速度、密度）参数反演方法，其本质上是一种最优化方法，其目的是寻找一个最优的地下介质模型，使得这个模型对应的模拟数据与实际观测数据达到最佳匹配。由于全波形反演在拟合模拟和观测数据过程中，利用了地震记录中全部的运动学和动力学信息，包含旅行时、振幅、相位等信息，因而具有精细反演复杂地质构造的能力，适合于对煤层工作面进行透明三维地质成像。根据核心算法，全波形反演算法流程如图2所示。

全波形反演首先需要建立模拟数据与观测数据之间残差的数学表达，即目标函数，然后采用最优化方法，通过模型迭代更新求取最优解。最优化方法有全局最优化方法和局域最优化方法。

全局最优化方法如蒙特卡洛法，由于计算量非常大、搜索效率较低，只适合较小模型计算，对三

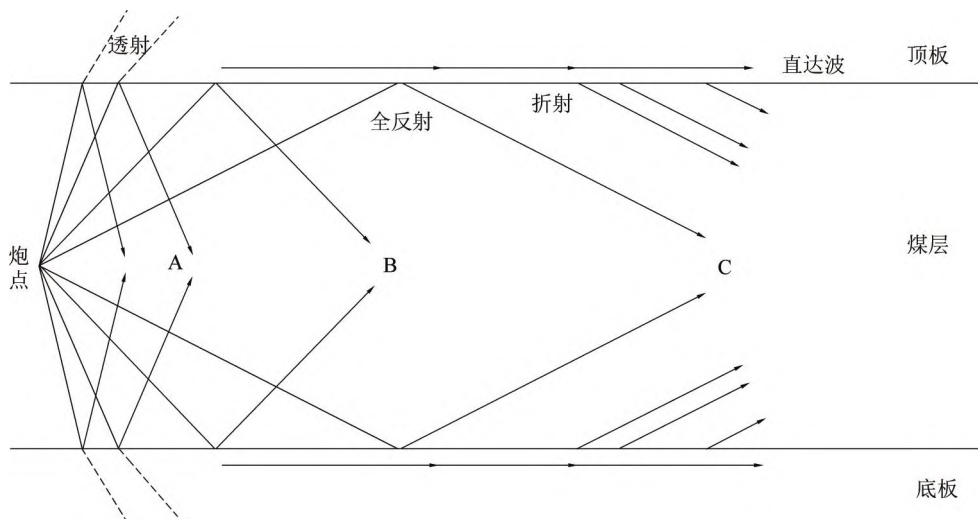


图1 槽波的形成原理

维问题更是难以应用。

局域最优化方法如梯度类方法和牛顿类方法,目前在全波形反演中较为常用。局域最优化方法通过给定一个起始搜索模型,然后在起始模型附近寻找目标函数最小值。由于反演问题往往是高度非线性的,而且目标函数并不是严格凸函数,存在较多极小值点,这使得局域最优化方法易陷入局部极值。因此,想让目标函数收敛到全局极小,初始模型必须要有一定的精度。多尺度逐级反演能够有效缓解反演问题的非线性特性,该方法首先反演大尺度模型,然后在大尺度模型基础上逐渐加入高频成分。此外,迭代步长的求取对于全波形反演结果和计算效率十分重要。

三维地质建模技术

构造建模是三维地质建模的基础和核心内容。构造建模就是根据已知地质、物探数据,利用相关原理与方法对地质体或地质现象的构造几何形态和拓扑关系进行模拟。构造建模是地学建模软件的核心模块,主要建立断层网模型、地层模型及其它地质体模型,不仅反映地质构造的几何形态,而且反映各构造地质要素之间宏观接触关系。建模过程中,还可加入地质学家的认识,准确描述出更接近地质实际的三维地质构造模型。只有建立完整、准确的三维构造模型,才能够更好地建立和表达其它各类

地质模型。

三维地质构造建模流程大致为:

- (1) 收集矿井的地质、物探资料,包括勘探工程资料、钻孔数据和物探数据等,建立数据库。
- (2) 建立三维地质框架,同时设置三维网格的精细程度。
- (3) 对采集的地震数据进行三维全波形反演,并结合已有地质、物探资料构建高精度三维地质模型。
- (4) 通过多种数据转换进行数据分析和地质统计,描述属性在空间的分布规律。
- (5) 用定性和定量的方法对地质模型进行检验,同时进行评价。

三维地质模型修正

根据三维地震全波形反演结果显示的复杂区域,在巷道揭露的局部复杂地质构造区域进行补充实测。目的是为了更精细地控制构造复杂区域的煤层顶(底)板的高程及起伏变化和小型异常地质构造精细的空间特性。

三维地质模型修正目的是确认地质异常(断层、夹矸等)的精细空间特性和三维地质建模成果,如顶(底)板、断层、夹矸等的精度,并通过巷道实测资料进行修正并提高三维地质模型精度,最终获得高精度的静态三维地质模型。

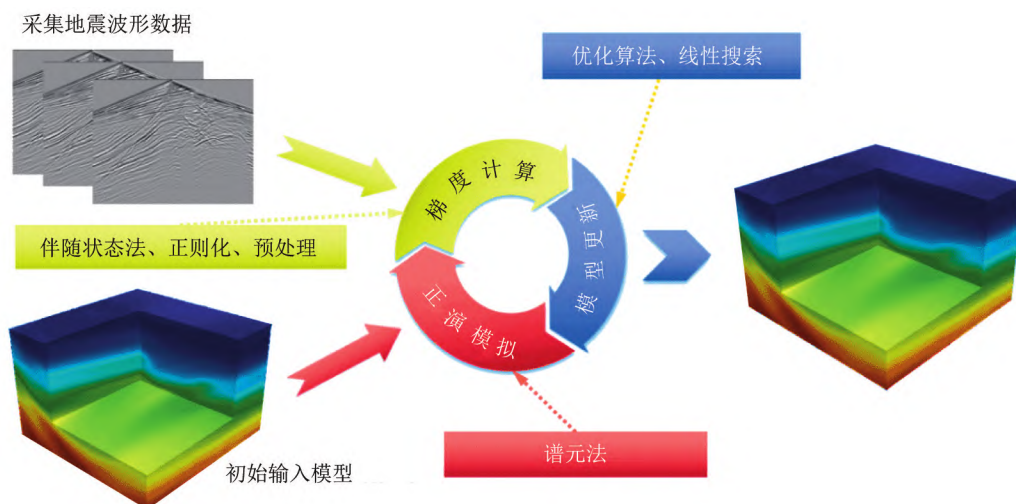


图2 全波形反演算法流程



三维地质模型动态更新

透明化工作面高精度三维地质模型是在特定的时空条件下构建的。在空间维度上,智能精准开采工作面的2个巷道和开切眼已经形成,煤层已被从采区局部分割出来,并处于2个巷道和开切眼的三面合围之中,成为一个有限空间的孤立煤体。在时间维度上,工作面回采是从开切眼开始,通过采煤机滚筒截齿从两巷斜切进刀,沿工作面宽度方向截割煤层,如此往复运动,逐步向前推进,最终完成整个工作面回采。因此,煤炭智能精准开采要求工作面的三维地质透明化必须满足智能开采对地质条件的高精度需求,一方面要确保回采工作面前方未采区域一定范围内地质条件的“透明化”,即精度要求;另一方面要在回采一定距离内完成透明化工作面三维地质模型的动态更新。

勘探区域在回采过程中,定期用全站仪进行测量校核煤层顶(底)板高程、煤厚及异常地质体空间特征等数据,将数据导入到计算机系统实现地质、测量数据的更新和可视化展示,同时提供地质模型剖切数据校核验证手段。

地震全波形反演技术应用实例

研究区地质概况

陕西小保当矿业有限公司(简称小保当煤矿)112204工作面地层总体为走向NNE,倾向NWW,整体倾角不足 1° 的单斜构造。辅助运输巷设计在 2^2 煤层中,该煤层赋存于延安组第四段顶部,是井田内最厚的主要可采煤层。埋深为305~387 m,煤层底板标高+924~+990 m;煤厚6.30~7.24 m,平均煤厚6.5 m;煤层由北向南逐渐变厚。根据三维地震报告,工作面内未发现断层和明显的褶皱构造,在单斜构造的框架之上发育有一些宽缓的波状起伏,亦无岩浆活动,属于简单构造类型。

本次三维建模区域处于112203辅助运输巷和112204运输巷之间,西至112203辅助运输巷2联巷处,东至10联巷和11联巷中央,长度640 m,宽度350 m。

观测系统布置方式

112204工作面设计目标探测区域长度500 m、宽度350 m。考虑到射线覆盖的密集度必须符合地震全波形反演的要求,本次数据采集观测系统设计为槽波双透反观测系统,即采取槽波透射和反射联合勘探观测方式。实际目标探测区域长度为640 m,炮点128个,炮间距10 m,112203辅助运输巷及112204运输巷内各64炮;设计检波点256个,检波距5 m,在112203辅助运输巷及112204运输巷内各布置检波器128个,检波器单排放置在巷道壁上的煤层孔中。

槽波地震勘探数据分析与成果解释

对112204工作面槽波信息进行数据处理,以及速度和能量成像。通过尖刺干扰压制、坏道处理、固定频率干扰去除、检波器共振干扰去除、检波器能量均衡与极性反转和反射槽波数据中声波去除的手段,得到槽波三分量速度与能量成像结果,确定工作面区域内三处地质异常,工作面左右两侧存在较为明显的煤层变薄区,112204运输巷处存在异常煤层松软破碎区。

地震全波形反演数据分析与成果解释

地震全波形反演数据中包含丰富的信息,为实现有效反演,需对实际地震数据和模拟地震数据进行多种预处理后作为输入。笔者设计了专门针对巷道全波形反演的地震数据预处理流程,首先对地震数据进行重新采样,选取合适的时间窗口分别提取P波、S波和槽波,去除数据中的坏道,通过带通滤波控制反演的频率范围,并使用能量均衡将振幅归一化,在迭代反演中,需要对地震进行多次处理。为提高效率,研究人员开发了地震数据批量处理脚本程序,并将程序与正演模拟和反演程序融合,形成了一套高效的反演流程(图3)。

根据112204工作面施工区域实际情况,建立112204工作面初始三维弹性速度模型。模型在 x 、 y 、 z 方向的长度分别为650、350、30 m(图4)。对



图3 地震数据初步处理流程

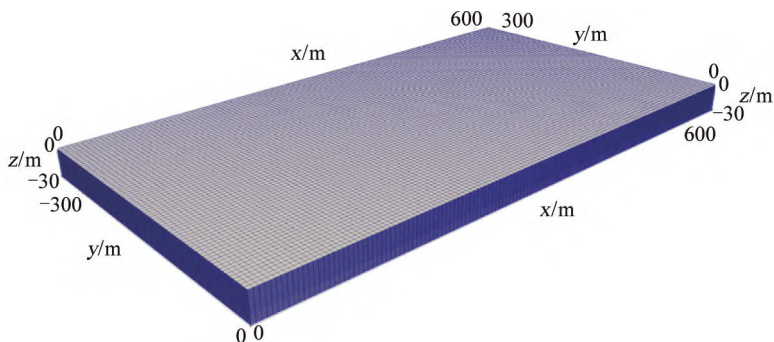


图4 地震全波形反演的三维模型网格

模型进行空间离散的网格,在 x 、 y 、 z 方向的网格数量分别为120、72、60。根据地震数据中P波和S波的旅行时,估计获得了初始模型的P波速度、S波速度和密度。

根据地震全波形反演算法流程,将全波形反演算法与方案应用于实际地震数据。首先,使用低频数据计算梯度,测试并获得合适的反演参数;然后,对目标区域的三维速度结构进行反演,并使用逆时偏移进行高精度成像;最后使用获得的速度结构和成像结果预测煤层的顶(底)界面和夹矸的空间分布。

通过设置时间窗口将数据中的P波和S波分离,使用互相关旅行时目标函数分别计算三维P波速度的梯度,使用频率段,并通过高斯函数卷积和mask函数去除梯度中的异常值。速度梯度在 x 、 y 、 z 方向都存在一定的变化,这与地下介质的岩石属性密切相关(图5)。由于使用的频率范围较低,只能构建低波数的速度结构,但梯度内的结构总体合理,可对速度模型进行有效的更新。本次地震全波形反演数据处理流程验证了算法的有效性和可行性,确定了数据处理参数和流程、频率范围、高斯光滑等参数,为后续反演做好准备。

根据上述反演理论对矿区的三维速度结果进行反演。除了在低频率段内,使用旅行时目标函数对三维P波和S波速度结构进行反演。还要使用槽波、

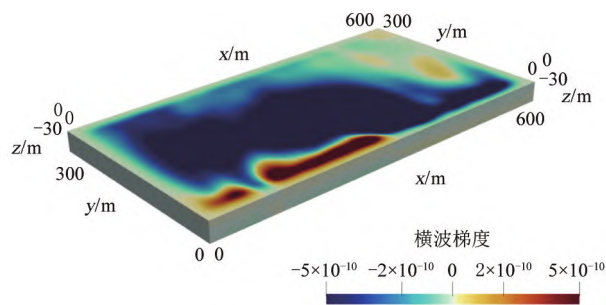


图5 计算获得的三维速度的梯度模型

直达P波和直达S波对速度结构进行反演。槽波成果的参与对煤层的顶底界面的反演更加有效。地震全波形反演技术的研究还在多尺度的高频率段,重复使用同样的反演流程与算法,从低频到高频逐步构建该矿区地下的速度结构。低频信息可反演速度的长波长背景结构,高频信息可构建地层的高频短波长精细结构。

基于地震全波形反演建立精准三维地质模型

通过地震全波形反演结果,并结合钻孔数据进行矫正,确定煤层顶底板界面构造形态,煤层顶底板构造特征一致,继承性较好,两者均呈现“112203辅助运输巷高、112204运输巷低”的构造格局,工作面整体呈现明显单斜构造(图6)。

基于地震全波形反演结果及槽波成像结果,在巷道实测数据的控制下,确定了112204工作面煤层



厚度分布特征。煤层厚度可划分为3个区域：1个较厚区（煤层厚度 ≥ 8 m），2个较薄区（煤层厚度 < 6 m）（图7）。较厚区域主要分布在工作面大范围中央地带（B1）；较薄区主要在工作面112203辅助运输巷一侧不规则大面积分布（B3）及左侧局部朵状分布（B2）。

基于地震全波形反演结果，对夹矸进行了识别

分析。工作面主要有1层明显夹矸，夹矸主要分为3个区带：2个夹矸较厚区，1个夹矸零值区（图8）。右侧出现小范围局部夹矸较厚区（S1），位于112203辅助运输巷与112204运输巷中间；此外，靠近112204运输巷异常出现第二处明显夹矸较厚区（S2），主要分布在（400，20）至（650，20）一

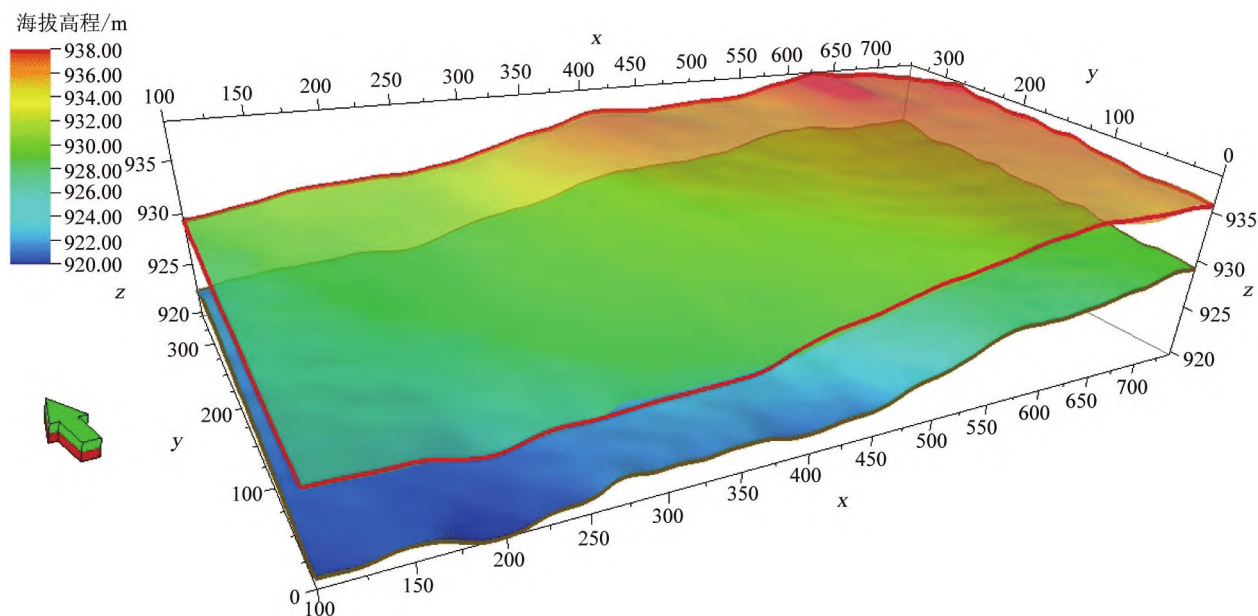


图6 112204工作面煤层顶底板三维展布

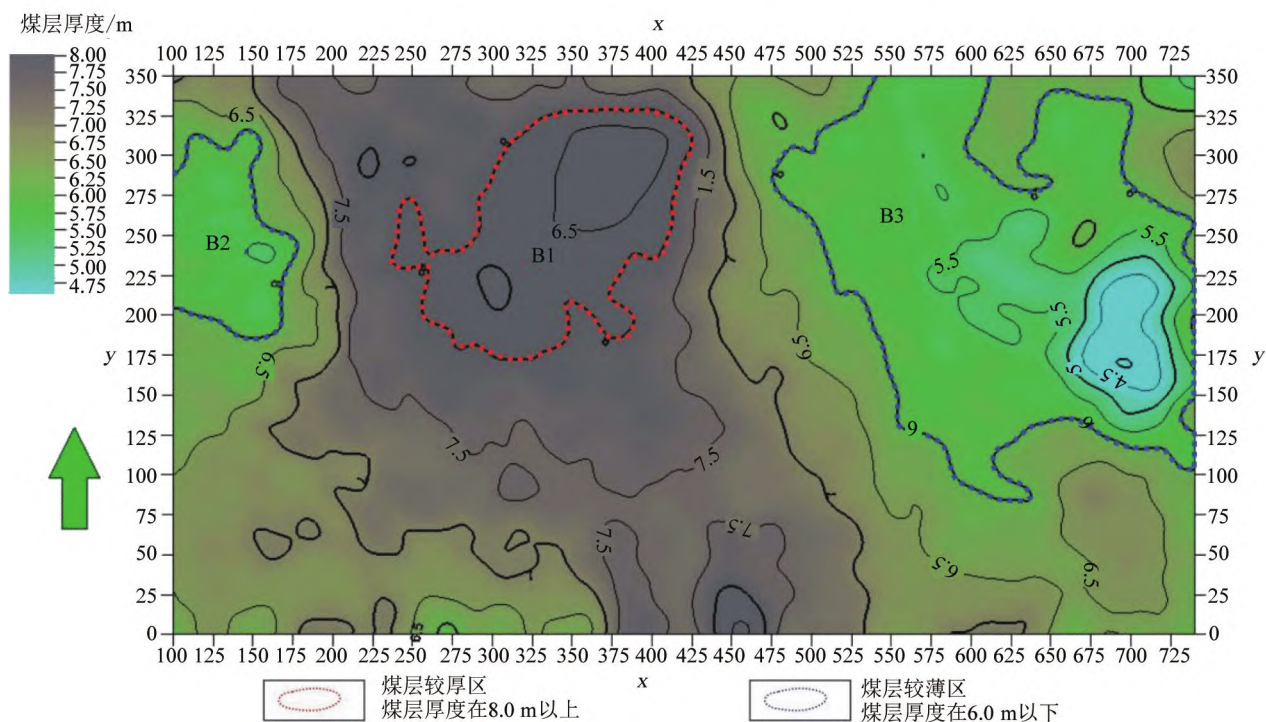


图7 112204工作面煤层厚度分布图(去掉夹矸后的煤厚)

带；在工作面左下侧出现大范围夹矸较薄区域和夹矸零值区（S3），整体均在0.1 m左右。

根据三维地质建模结果，煤层与夹矸展布特征基本一致，夹矸“嵌入”于煤层中，在研究区呈现较为单一的单斜构造，煤层顶底板继承性较强，顶底板均呈现“112203辅助运输巷高、112204运输巷低”的构造格局。研究区煤层三维地质构造建模结果如图9所示。

结果分析

通过理论分析与实际应用，得出在小保当煤矿112204工作面中全波形反演在矿井中反演成像的具体研究方法，形成了一套基于全波形反演技术的精准三维地质模型的方法，解决了小保当煤矿112204工作面三维透明化的难题；形成了一套三维弹性波正演模拟的全波形反演算法和程序，精确高效地模

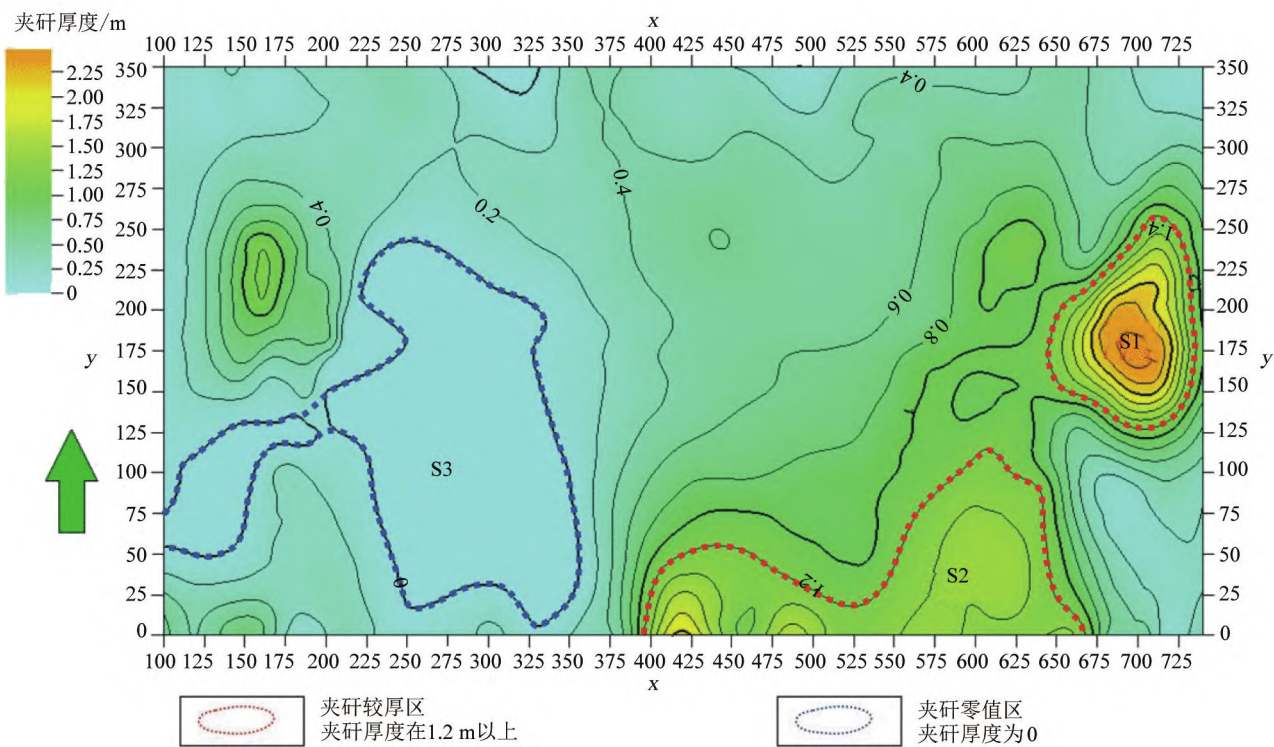


图8 112204工作面煤层夹矸厚度分布

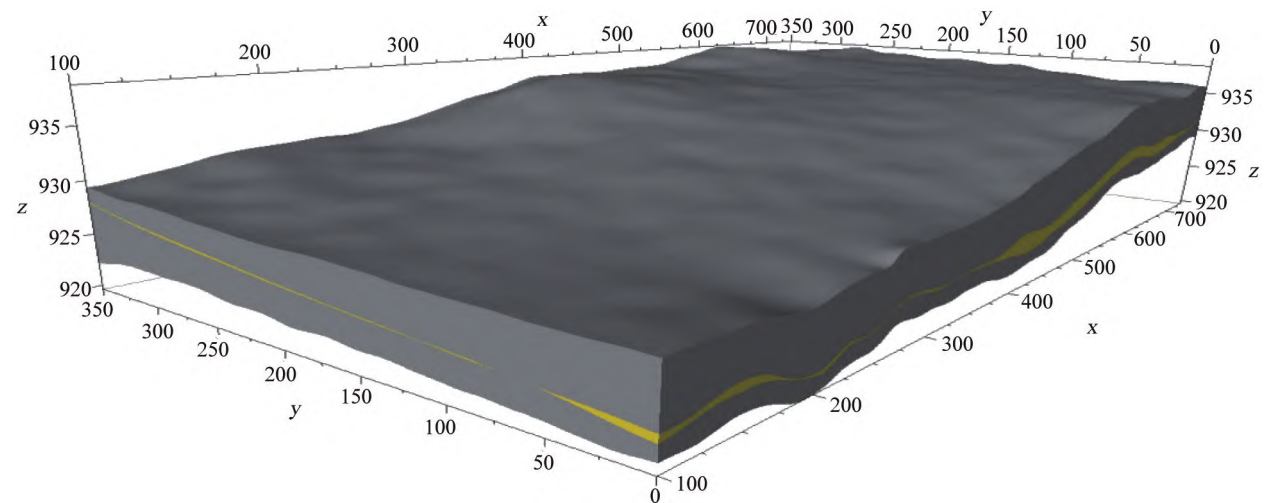


图9 研究区煤层三维地质构造建模结果



拟地震波在复杂介质中的传播,并对地下三维速度结构进行高精度和高分辨率反演成像;开发完成“重采样-窗口选取-去坏道-能量均衡”等一系列地震数据批量处理程序;完成了一套“正演模拟-梯度计算-模型更新”的全波形反演流程,形成了从低频到高频的多频段分析方案,建立了工作面低频长波和高频短波的三维横波和纵波速度模型。

此外,还确定了以地震全波形反演结果为主、以槽波结果数据为辅、结合巷道实测和工作面钻孔信息矫正的多数据融合分析研究方案,建立采煤工作面精准三维地质模型。最终确定小保当煤矿112204工作面煤层顶底板和夹矸三维空间形态特征,圈定了112204工作面存在1处煤层较厚区,2处煤层较薄区,3处夹矸异常区。

结 语

通过选定适合进行全波形反演数据采集及成像的里程段进行测试,确定合适波段的全波形反演参数,采用巷道与钻孔数据及全波形反演分析结果,

建立工作面三维构造模型,最终形成一套针对该矿井工作面可行的基于地震全波形反演技术建立精准三维地质模型的方法。地震全波形反演技术对于提升工作面三维透明化技术水平有积极意义,为构建三维地质模型提供了一种新的思路和方法,有利于后续煤矿智能化的开采。

地震全波形反演技术在小保当煤矿112204工作面的成功试点,不仅为矿方解决了实际生产过程遇到的地质问题,为工作面下一步开采提供科学指导,为地震全波形反演技术在该矿应用积累原始素材和真实案例,也为引进物探新技术、新方法提供新思路。

■ 助理编辑:戴春雷

作者简介:

第一作者:杜少鹏,工程师,硕士,现任北京中矿大地地球探测工程技术有限公司技术研发中心经理。E-mail: 986069394@qq.com

作者单位:北京中矿大地地球探测工程技术有限公司

热点问答

煤矿瓦斯灾害的智能化痛点主要有哪些?

(1) 煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸等煤矿瓦斯灾害破坏性巨大,一旦发生,损失严重,且容易引起群死群伤,造成重、特重大事故,需要对瓦斯灾害进行在线监测和预测预警,避免瓦斯灾害发生。

(2) 瓦斯灾害成因复杂,影响因素众多,且不同矿井的地质条件、生产条件、装备水平等不同,瓦斯灾害主控因素并不相同,需要结合矿井实际条件,从多元信息融合角度进行预测预警,但现有的瓦斯灾害预测预警大多从单一因素出发,采用法律法规推荐指标及临界值,预测预警结果的准确性不高。

(3) 瓦斯灾害特别是煤与瓦斯突出灾害防治过程复杂,流程多、环节多、信息多、部门多,管理难度大,存在信息孤岛,急需信息化管理手段,提高管理效能和管理水平,实现信息集成和透明共享。

(4) 煤矿安全监管监察部门对瓦斯超限处罚十分严厉,现有的煤矿安全监控系统以瓦斯超限报警为主,预警能力较弱,急需对瓦斯超限进行预测预警。

(5) 瓦斯灾害相关参数检测、采集的信息化、自动化水平整体不高,众多参数依靠人工完成,导致瓦斯灾害预警系统自动化水平不高,运维维护工作量大。

(6) 预测预警与控制脱节,还停留在瓦斯超限断电控制上,不具备预警联动控制功能,不能根据预警原因和预警等级对采掘设备割煤速度、通风设施设备风量、钻机钻孔施工作业、瓦斯抽采系统工况等进行自动调节控制。

——来源:《中国煤矿智能化发展报告(2022)》