

王忠伟,崔晓芹,杜文凤,等. 煤矿采区三维地震资料连片处理关键技术及其应用[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 40-47. DOI: 10. 19606/j. cnki. jmst. 2024939

WANG Zhongwei, CUI Xiaoqin, DU Wenfeng, et al. Key technique of 3D seismic data merged processing and its application in the coal mining district[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 40-47. DOI: 10. 19606/j. cnki. jmst. 2024939

煤矿采区三维地震资料连片处理关键技术及其应用

王忠伟¹, 崔晓芹², 杜文凤², 孙庆华¹

1. 国能蒙西煤化工股份有限公司, 内蒙古乌海 016062;
2. 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083

摘要:针对煤矿不同盘区三维地震资料采集参数和施工条件的不一致问题,分析了三维地震资料连片处理的主要技术难点,提出了三维地震资料连片处理解决方法,建立了三维地震资料连片处理流程。在统一观测系统下,将静校正和剩余静校正相结合,对不同盘区数据静校正量进行计算,实现全区静校正处理。叠前组合去噪方法采用分类、分步、分频、分域和分时处理,有针对性地压制噪声,来提高地震资料信噪比。采用地表一致性振幅补偿方法,消除炮点和检波点变化所造成的地震波能量在空间上的差异,实现全区地表一致性振幅均衡。建立合理的偏移速度场,通过叠前时间偏移,获得波组特征明显、反射波与断面波合理归位的偏移数据体。实际地震资料处理结果表明,所建立的三维地震资料连片处理技术与流程可有效消除不同盘区地震数据的不一致性,提高不同盘区边界处地震资料的处理质量。

关键词:三维地震数据;连片处理;煤矿采区;静校正;去噪;偏移

中图分类号:TD 411

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0040-08

Key technique of 3D seismic data merged processing and its application in the coal mining district

WANG Zhongwei¹, CUI Xiaoqin², DU Wenfeng², SUN Qinghua¹

1. Mengxi Coal Chemical Industry Co., Ltd., CHN Energy, Wuhai Inner Mongolia 016062, China;
2. State Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, Beijing 100083, China

Abstract: This paper analyzes the main technical difficulties in the merged processing of 3D seismic data in different coal mining areas due to the inconsistency of acquisition parameters and construction conditions. It proposes a solution for the merged processing of 3D seismic data and constructs 3D seismic data merged processing flow. Under the unified layout system conditions, the paper adopts a combination of static correction and residual static correction to calculate the static correction amount of different area data and complete the static correction processing of the whole area. The pre-stack combination denoising method adopts classification, step-by-step, frequency division, domain division, and time-division processing to selectively suppress noise and improve the signal-to-noise ratio of seismic data. The surface consistency amplitude compensation method is used to eliminate the spatial differences in seismic wave energy caused by changes in shot and receiver points, and achieve amplitude balance of sur-

收稿日期:2024-05-16 修回日期:2024-10-24

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3008901)

作者简介:王忠伟(1986—),男,吉林通化人,工程师,主要从事煤矿技术管理工作。E-mail:181234354@qq.com

通信作者:杜文凤(1963—),女,吉林扶余人,博士,教授,主要从事煤田三维地震勘探教学与科研工作。E-mail:duwf@cumt.edu.cn

face consistency throughout the whole area. After establishing a reasonable migration velocity body, pre-stack time migration is carried out to obtain a migration data body with obvious wave group characteristics and reasonable positioning of reflection waves and fault plane waves. The actual seismic data processing results show that the established 3D seismic data merged processing technology and flow can effectively eliminate the inconsistency of seismic data in different areas and improve the processing quality of seismic data at the boundaries of different areas.

Key words: 3D seismic data; merged processing; coal mining district; static correction; denoising; migration

煤矿采区三维地震勘探成果是煤矿设计和煤矿安全生产的重要基础资料。根据煤炭开采进程和勘探地质目的,煤矿采区三维地震勘探工程通常对不同盘区或采区进行分期、分块勘探。不同盘区三维地震勘探所使用的地震观测系统和仪器设备会有所不同,从而导致不同盘区三维地震资料存在明显的不一致性。

三维地震资料连片处理技术是将不同盘区地震数据统一处理,在常规地震数据处理技术^[1]的基础上,采用有针对性的处理技术^[2],消除各盘区地震数据间由于仪器差异、地表条件差异、观测系统差异等因素导致的不一致性,提高不同盘区边界处地震资料质量。三维地震资料连片处理近年来在油田得到深入研究和应用。赵玉莲等^[3]以柴达木盆地扎哈泉北斜坡地区为例,开展了连片处理关键技术研究,获得了高信噪比、高分辨率、高保真地震资料;王伟等^[4]、熊艳梅等^[5]探讨了三维地震资料连片中信噪比一致性处理技术,采用五维规则化及基于覆盖次数的能量调整方法,解决了能量不一致的问题;袁丽华^[6]开展了海拉尔盆地三维地震资料连片处理,解决了空面元问题,显著改善了连片地震资料品质。

随着煤矿开采不断推进,开展煤田三维地震资料连片处理成为煤矿生产中的迫切需求,一方面可以避免对以往盘区进行重复地震勘探采集,节省成本,提高地震资料使用率;另一方面可以避免以往盘区内已采煤层的影响,提高地震资料处理和解释精度。本文以内蒙古棋盘井煤矿为例,以石炭系上统太原组上段和二叠系下统山西组含煤地层中的 9 号煤和 16 号煤为主要处理目标层,对矿区内 6 个盘区三维地震资料开展连片处理,为地震资料地质构造精细解释和岩性精准识别提供坚实基础。

1 三维地震资料连片处理技术难点与解决办法

1.1 处理技术难点

三维地震数据处理的盘区共有 6 个,不同盘区

三维地震勘探观测系统不尽相同,震源类型有炸药激发和可控震源激发 2 种,面元大小有 $5\text{ m}\times 10\text{ m}$ 和 $10\text{ m}\times 10\text{ m}^2$ 种,覆盖次数有 15、20 和 24 次 3 种,如图 1 所示。

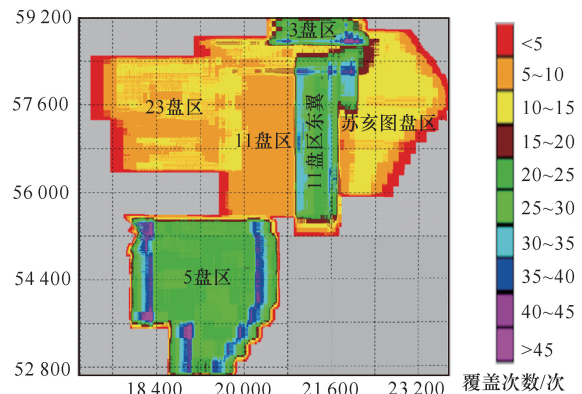


图 1 不同盘区覆盖次数

Fig. 1 Fold numbers of different areas

通过对三维地震原始资料进行分析,发现三维地震资料连片处理面临如下主要技术难点:

(1) 一致性问题。参加三维地震资料处理的盘区共有 6 个,由于采集时间、仪器、施工人员、地表条件和观测系统等因素影响,数据特征存在很强的不一致性。盘区衔接段频率、相位、能量等存在不一致,偏移速度场不统一,带来偏移归位不准问题,易导致构造解释出现偏差。因此,对不同盘区地震资料存在的差异进行校正,消除边界效应,是连片处理的重中之重。

(2) 静校正问题。三维地震勘探范围内地表为低矮平缓的丘陵地貌,海拔 $1\ 292\sim 1\ 442.8\text{ m}$,地表相对高差较大。地表既有基岩裸露区,又有砂土层及砾石风化层覆盖区,浅层地震地质条件较差。区内低、降速带发育,野外静校正问题突出。因而,能否准确确定低速带模型,进而求取精确的野外静校正量,是影响处理质量的关键。

(3) 高保真去噪问题。区内噪声发育,不同种类噪声同时存在,面波、线性干扰、强振幅异常等噪声大大降低了地震资料信噪比,要获得高质量的成

像数据,需要对这些噪声进行有效压制。

(4) 能量均衡问题。各盘区间、相同盘区内部的道与道、炮与炮之间的能量不均衡,因此,解决好不同盘区间和盘区内的能量差异问题,也是处理要解决的重点问题之一。

1.2 解决办法

针对上述三维地震资料连片处理技术难点,提出如下针对性的解决方法:

(1) 通过对不同盘区观测系统进行分析,合理地对各盘区观测系统进行整合,将不同面元的数据统一成 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的面元,实现观测系统统一。

(2) 确定不同盘区数据在统一观测系统下的静校正量,实现全区统一静校正。

(3) 在保幅前提下,消除各种因素造成的能量差异,使各盘区间、相同盘区内部的道与道、炮与炮之间的能量均衡,实现全区地表一致性振幅均衡。

(4) 针对地表条件、采集因素造成的子波、能量等差异,采用地表一致性反褶积技术,对不同盘区间子波差异带来的拼接影响,采用子波整形技术,实现全区地表一致性反褶积与频率、相位一致性校正。

1.3 连片处理流程

根据三维地震资料连片处理难点和针对性的解决方法,提出了三维地震资料连片处理流程(图2),其中静校正处理、叠前组合去噪、一致性处理和偏移成像为关键处理技术。

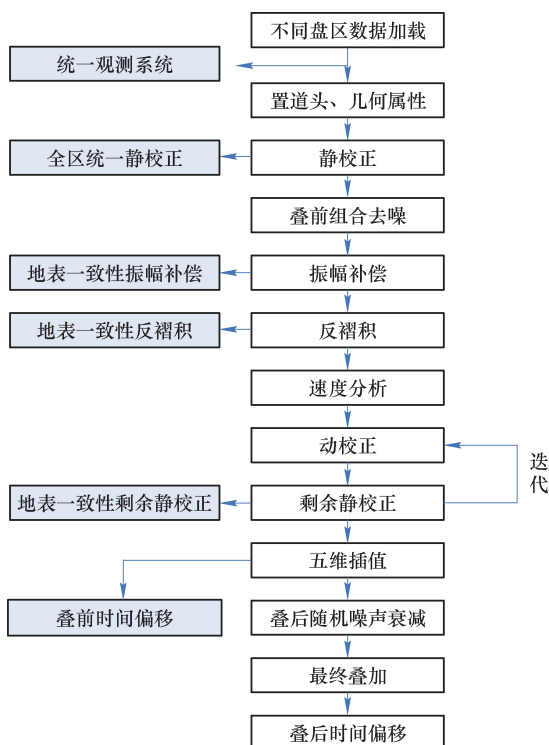


图2 三维地震资料连片处理流程

Fig. 2 3D seismic data merged processing flow

静校正处理采用层析成像静校正技术,利用层析反演,建立近地表速度模型,避免因界面不明显而引起的静校正误差,同时解决长波长静校正问题,对地下低幅构造进行有效识别。

采用组合去噪方法,在振幅补偿前和反褶积前后等处理环节进行迭代,保护有效波,压制干扰噪声,提高地震资料信噪比。

一致性处理采用地表一致性振幅补偿、地表一致性反褶积和地表一致性剩余静校正等方法,消除各种因素造成的能量、频率、相位和时间差异。

叠前时间偏移通过迭代优化连片速度模型,提高偏移归位的准确性和对地下地质构造成像的精度。

2 连片处理关键技术

2.1 静校正处理

静校正处理目的是消除低速带厚度、速度和地形变化引起的波场畸变,是后续地震数据处理的基础。因此,静校正问题和静校正技术的应用在地震数据处理中至关重要。各盘区地表情况复杂,分盘区处理地震资料会导致盘区间存在闭合差,静校正问题突出。

针对高程静校正、折射波静校正和层析静校正进行试验,为保证试验的准确性,每种静校正方法分别拾取叠加速度^[7]。图3为折射层速度模型。通过综合对比,最终选用层析静校正方法。处理采用的高程范围为海拔 $1\ 292\sim 1\ 442.8\text{ m}$,基准面为 $1\ 450\text{ m}$,替换速度为 $3\ 000\text{ m/s}$ 。

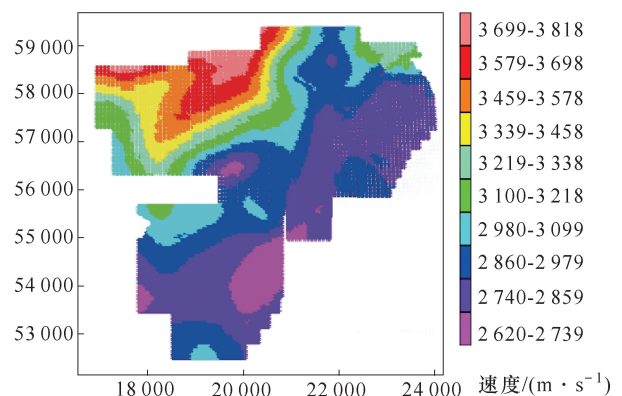


图3 折射层速度模型

Fig. 3 Refractive layer velocity model

图4为单炮静校正处理前后对比图,静校正前,单炮初至起跳明显,经过静校正后,单炮初至光滑,且反射波双曲线特征有所改善,说明静校正量比较准确。

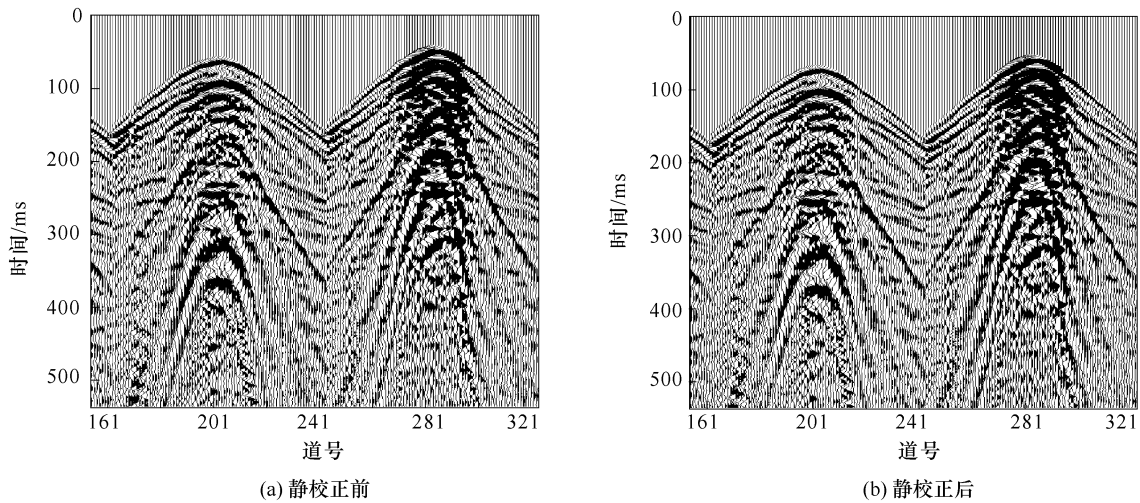


图4 单炮折射静校正前后对比

Fig. 4 Comparison of single shot before and after refraction static correction

2.2 叠前组合去噪

在地震叠前资料处理中,各种噪声的衰减和压制是十分重要的^[8-10]。不同盘区原始三维地震资料声波、面波、线性干扰、随机噪声和野值等干扰波发育,对地震资料成像质量带来严重影响,为此提出叠前组合去噪方法,即采用分类、分步、分频、分域和分时方法,进行针对性地噪声压制,在保护有效波的同时,压制干扰噪声,使叠前噪声得到衰减。

叠前去噪处理技术不是单个模块、单个流程就能够完成,而是根据需要在振幅补偿前、反褶积前后等环节反复进行,并要根据地震数据特点,灵活地选择数据域,进行噪声压制。图5为叠前多域逐级去噪前后叠加剖面,去噪后地震剖面上的面波与线性规则噪声压制效果较好,同时有效信号得到较好保护,信噪比得到很大提高。

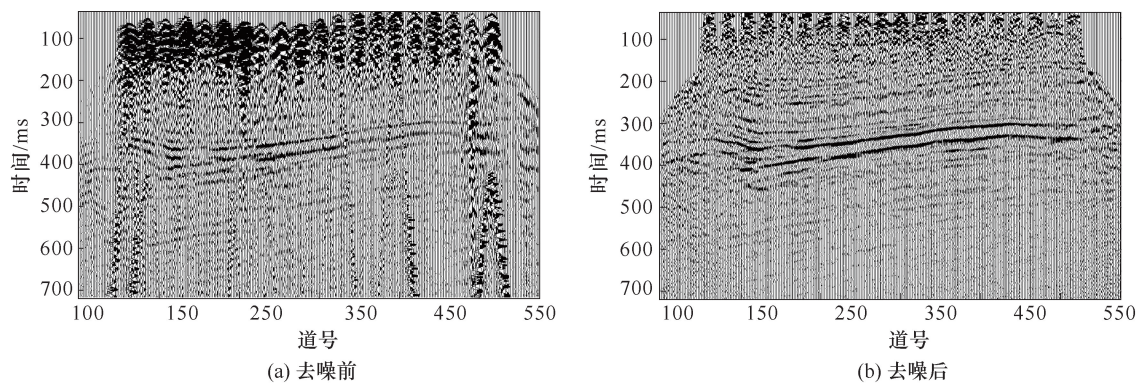


图5 叠前多域逐级去噪前后叠加剖面

Fig. 5 Stacked section before and after gradually denoising in multiple domains

2.3 一致性处理

不同区块地震资料的振幅、频率和相位存在明显差异,一致性处理至关重要^[11]。一致性处理目的是补偿地震记录能量损失、改善地震记录能量横向的一致性^[12]。

(1) 地表一致性振幅补偿。受地震波几何扩散和地表激发接收因素的影响,地震记录深浅能量、炮间能量、道间能量存在不均衡,影响偏移成像。为了消除这些影响,就需要进行振幅补偿处理。

振幅补偿处理一般包括几何扩散补偿(或球面扩散补偿)和地表一致性振幅补偿。采用几何扩散补偿技术,可以补偿由于几何扩散现象或球面扩散现象导致的地震资料在纵向上的能量差异;使用地表一致性振幅补偿技术可以消除激发和接收因素变化所造成的地震波能量在空间上的差异,使叠加剖面在横向上能量达到均衡。

(2) 地表一致性反褶积。反褶积是通过压缩地震子波,来提高地震资料的纵向分辨率。地表一致性预测反褶积,能够对炮点和检波点分别应用不

同的参数,有效消除虚反射,并压缩子波^[13]。

根据实际地震资料分析,反褶积采用地表一致性反褶积与预测反褶积组合方法,前者可以减小由于地表因素带来的子波差异,后者可以提高地震资料纵向分辨率,同时对多次波有一定压制作用。

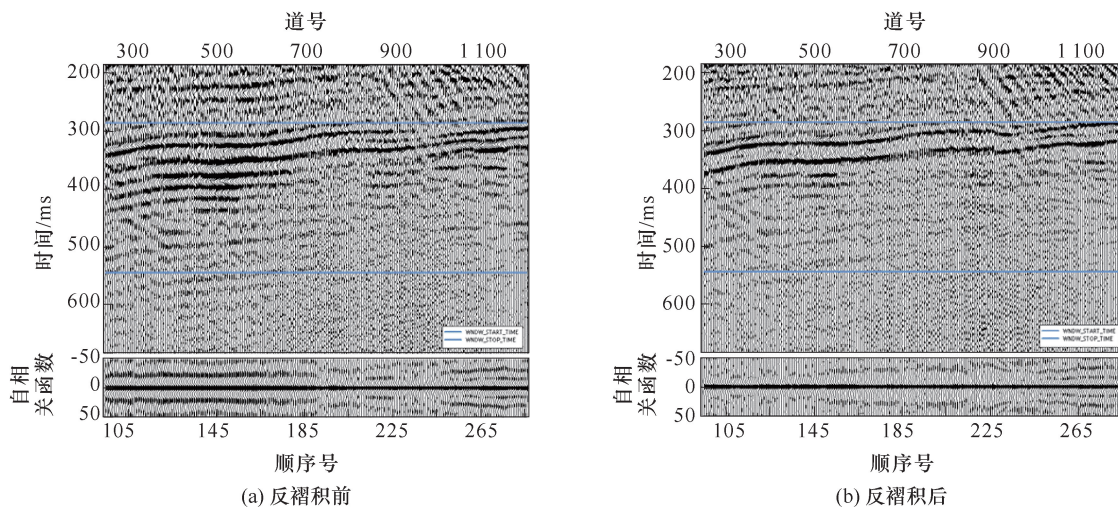


图6 反褶积前后叠加剖面 and 自相关函数

Fig. 6 Stacked section and autocorrelation functions before and after deconvolution

(3) 速度分析与地表一致性剩余静校正。在解决基础静校正后,通常还需要利用剩余静校正方法消除中短波长对成像的影响^[14-16]。通过速度分析和剩余静校正迭代处理,可以获得最优叠加剖面和最佳叠加速度,为后期偏移成像处理奠定基础。

叠加速度不仅与地层倾角有关,而且还与炮检方位角、均方根速度有关。因此,进行三维速度分析,应与静校正和噪声去除同时进行。在速度分析过程中,要进行三维地表一致性剩余静校正与速度分析的迭代处理。

速度分析时,在速度谱上拾取速度,通过观察道集是否拉平,来判断速度拾取是否准确。自动剩余静校正基于地表一致性假设的,先构成一个模型道,将各道与模型道在一个指定时窗范围内进行相关处理。

反射波剩余静校正计算时窗,应选在反射波品质较好、构造相对简单的反射层位上。剩余静校正后的剖面质量应不低于校正前的质量。在地震满覆盖区,最后一次求得的剩余静校正量,90%以上的炮点和检波点不应大于地震数据处理的一个采样间隔。

2.4 偏移成像处理

叠前时间偏移^[17-18]采用克希霍夫保幅型叠前时间偏移技术。克希霍夫三维叠前时间偏移方法使用均方根速度模型,计算三维旅行时,具有偏移

地表一致性反褶积对提高不同盘区拼接的一致性有一定作用,但为了保证拼接质量,仍需进行子波整形处理。图6为反褶积前后叠加剖面 and 自相关函数。可见,反褶积后叠加剖面分辨率得到增强。

运算快、成像精度高的特点,偏移效果主要受速度模型、地层倾角、孔径等参数影响。

叠前时间偏移主要流程:① 将共炮点记录从接收点上向地下外推;② 计算从炮点到地下点的地震波入射射线的走时;③ 将所有深度点进行波场延拓,提取成像值,组成偏移剖面,完成一个炮道集的克希霍夫积分法偏移;④ 将所有炮道集记录按地面点相重合的原则进行叠加,即完成叠前时间偏移。

叠前时间偏移处理前后地震剖面对比如图7所示。叠加地震剖面上,断点处形成双曲线形态的绕射波^[19-20],断点处能量最强、向两侧变弱,如图7(a)所示;经过叠前时间偏移处理后,断点处绕射波收敛,断点清楚,如图7(b)所示。偏移后地震剖面的波组特征明显,同相轴连续可追踪,目的层突出,剖面上反射波、断面波归位合理,断点清晰,无空间假频现象,地震资料信噪比和分辨率得到提高。

通过叠前时间偏移处理后,在水平切片上,不同盘区边界处的地震波振幅能量变化无边界效应,能真实地反映地层变化情况,如图8(a)所示;在地震剖面上,不同盘区边界处的地震波同相轴延展自然,如图8(b)所示。这说明利用三维地震资料连片处理技术可以有效消除不同盘区地震数据间由于仪器差异、地表条件差异、观测系统差异等导致的不一致性,提高盘区边界处地震资料的处理品质。

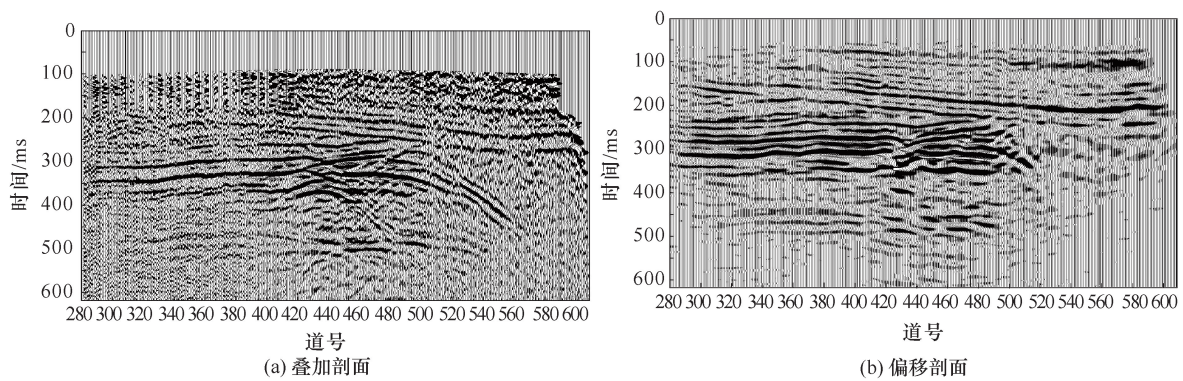


图 7 叠前时间偏移处理前后地震剖面对比

Fig. 7 Comparison of seismic section before and after pre-stack time migration

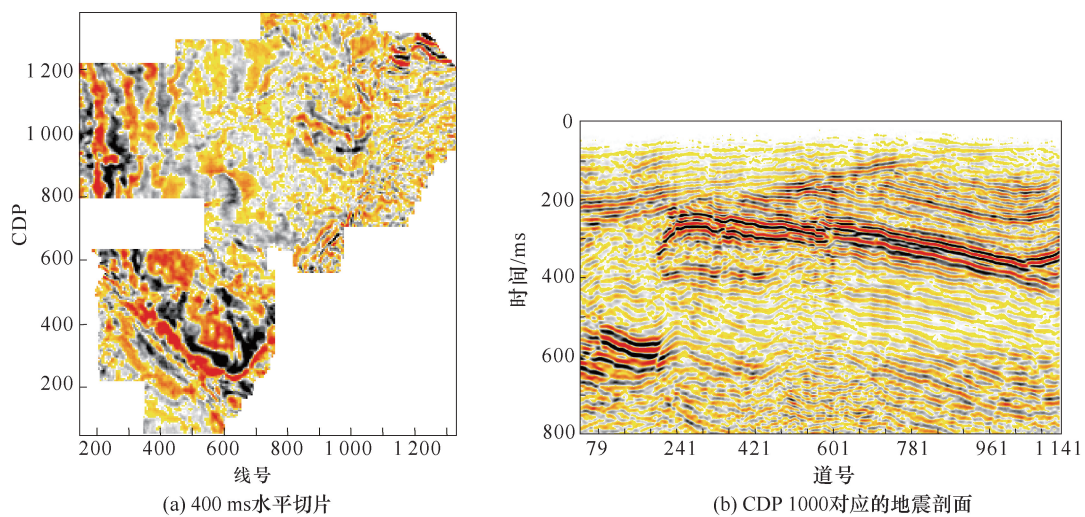


图 8 三维地震资料连片处理结果

Fig. 8 Result of 3D seismic data merged processing

2.5 处理主要参数

基于所建立的三维地震资料连片处理技术与流程,开展了不同盘区三维地震资料处理,有效消除了不同盘区地震数据的不一致性,三维地震资料处理主要参数见表 1。

表 1 主要处理参数

Table 1 Main processing parameter

处理方法	参数	参数值
静校正	基准面	1 450 m
	替换速度	3 000 m/s
去噪	面波压制速度	1 000 m/s
	面波压制频率	1~16 Hz
	相干噪音压制速度	1 400~2 200 m/s
反褶积	算子长度	120 ms
	预测步长	20 ms
速度分析	网格	100 m×100 m
剩余静校正	时窗	100~800 ms
	迭代次数	8 次
叠前时间偏移	偏移孔径	2 000 m
	最大倾角	90°

3 结 论

针对煤矿不同盘区三维地震资料采集参数和施工条件的不一致问题,建立了一套适合矿区地质特点的三维地震资料连片处理流程与方法,采用静校正、叠前组合去噪、一致性处理和叠前时间偏移成像等关键处理技术,统一不同区块地震数据振幅、频率、相位和时差等处理参数,有效消除不同区块地震数据在振幅、频率、相位和时差等属性上的不一致,提高三维地震数据成像质量。研究取得的主要结论如下:

(1) 采用静校正和剩余静校正相结合,可以有效消除地表等因素对反射波时距曲线的影响,解决了不同盘区低降速带的影响问题。

(2) 采用叠前组合去噪,分频、分域、分区逐级压制噪声,可以很好地压制不同类型噪声,对有效信号不会产生伤害,提高了地震资料信噪比,在保真基础上,增强了目的层有效波能量。

(3) 采用地表一致性振幅补偿、地表一致性反褶积和地表一致性剩余静校正等组合技术,对不同盘区地震资料存在的差异进行校正,可以有效解决不同盘区频率、相位、能量等存在的不一致。

(4) 建立合理偏移速度场,采用叠前时间偏移获得的地震剖面波组特征明显,同相轴连续可追踪,目的层突出,反射波、断面波归位合理,绕射波收敛,断点清晰,无空间假频现象。

参考文献

- [1] 彭苏萍,袁亮. 淮南煤矿三维地震勘探技术应用与效果[J]. 安徽地质,2011,21(2):95-99.
PENG Suping, YUAN Liang. Research and achievements of three dimensional seismic prospecting technologies in huainan coal mines [J]. Geology of Anhui, 2011,21(2):95-99.
- [2] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(7):2331-2345.
- [3] 赵玉莲,张涛,冯心远,等. 三维地震资料连片处理关键技术及其应用——以柴达木盆地扎哈泉北斜坡地区为例[J]. 天然气地球科学,2023,34(5):914-927.
ZHAO Yulian, ZHANG Tao, FENG Xinyuan, et al. Application of 3D Seismic data merged Processing technology in the northern slope area of Zhahaquan[J]. Natural Gas Geoscience, 2023,34(5):914-927.
- [4] 王伟,刘振宽,张品,等. 三维地震资料连片中信噪比一致性处理技术探讨[J]. 石油地球物理勘探,2022,57(S1):65-69,9.
WANG Wei, LIU Zhenkuan, ZHANG Pin, et al. Discussion on processing methods of signal to noise ratio consistency in merging of 3D seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(S1):65-69,9.
- [5] 熊艳梅,徐春梅,郭达理,等. 非刚性匹配技术在地震资料一致性处理中的应用[J]. 地球物理学进展,2017,32(1):306-310.
XIONG Yanmei, XU Chunmei, WU Dali, et al. Application of non-rigid matching technique in consistency processing of seismic data [J]. Progress in Geophysics, 2017. 32(1):306-310.
- [6] 袁丽华. 海拉尔盆地三维地震资料连片处理关键技术及其应用效果[J]. 大庆石油地质与开发,2019,38(6):125-131.
YUAN Lihua. Key technique of 3D seismic data sequential processing and its application effect in Hailar Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019,38(6):125-131.
- [7] 徐茂轩,杜文凤,赫云兰,等. 准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测[J]. 矿业科学学报,2023,8(5):593-599.
XU Maoxuan, DU Wenfeng, HE Yunlan, et al. 3D seismic prediction of low rank coalbed methane enrichment area in the southern margin of Junggar Basin [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(5):593-599.
- [8] 邹世英,杨博. 基于 GeoEast 的叠前去噪技术应用效果分析[J]. 长江大学学报(自然科学版),2023,20(6):49-55.
ZOU Shiyong, YANG Bo. Analysis of the application effect of the pre-stack denoising technology based on GeoEast [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2023,20(6):49-55.
- [9] 曹静杰,高康富,许银坡,等. 基于一种注意力机制 U-Net 的地震数据去噪方法[J]. 石油地球物理勘探,2024,59(4):724-735.
CAO Jingjie, GAO Kangfu, XU Yinpo, et al. Seismic data denoising method based on an attention mechanism U-Net [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(4):724-735.
- [10] 包乾宗,周梅,邱怡. 基于 Curvelet 域的注意力机制卷积网络地震数据去噪[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(8):165-176.
BAO Qianzong, ZHOU Mei, QIU Yi. Seismic data denoising based on the convolutional neural network with an attention mechanism in the curvelet domain [J]. Coal Geology & Exploration, 2024,52(8):165-176.
- [11] 李晓峰,王晓涛,林娟,等. 一致性处理技术在准噶尔盆地三维连片处理中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2018,53(S2):33-41,8.
LI Xiaofeng, WANG Xiaotao, LIN Juan, et al. Consistent processing for 3D seismic data merging in Junggar Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S2):33-41,8.
- [12] 周艳. 地震资料一致性处理方法研究与应用[J]. 江汉石油职工大学学报,2019,32(3):10-12.
ZHOU Yan. Research and Application of Consistency Processing Method of Seismic Data [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2019, 32(3):10-12.
- [13] 杜鑫,张广智,刘沛然. 两种反褶积技术应用效果的对比[J]. 石油物探,2021,60(S1):85-89.

- DU Xin, ZHANG Guangzhi, LIU Peiran. Comparison of two deconvolution methods[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(S1):85-89.
- [14] 徐兴荣,苏勤,孙甲庆,等.高精度组合剩余静校正方法及其应用[J].岩性油气藏,2021,33(5):132-139.
- XU Xingrong, SU Qin, SUN Jiaqing, et al. High precision combined residual static correction method and its application[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(5):132-139.
- [15] 袁联生.基于Spark的叠加能量寻优反射波剩余静校正算法的工程化实现[J].石油物探,2024,63(4):807-816.
- YUAN Liansheng. Engineering realization of reflection residual static correction optimized using Spark-based stacked energy[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(4):807-816.
- [16] 余青露,刘晗,陈林谦,等.2020.基于成像域射线束建模的剩余静校正方法研究及应用[J].地球物理学进展,35(2):680-685.
- YU Qinglu, LIU Han, CHEN Linqian, et al. Research and application of residual static correction method based on imaging domain beam modeling[J]. Progress in Geophysics, 35(2):680-685.
- [17] 丁建荣,薛永安,庞全康.基于菲涅尔带多个成像点叠加的叠前时间偏移方法研究[J].地球物理学进展,2022,37(4):1535-1540.
- DING Jianrong, XUE Yongan, PANG Quankang. Study on pre-stack time migration based on multi-CRP stack method within Fresnel zone[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4):1535-1540.
- [18] 刘俊成,陈祥忠,郭井学,等.最小二乘Kirchhoff射线束叠前时间偏移[J].地球物理学报,2021,64(5):1690-1698.
- LIU Juncheng, CHEN Xiangzhong, GUO Jingxue, et al. Prestack time migration based on the least-squares Kirchhoff beam[J]. Chinese Journal Geophysics, 2021, 64(5):1690-1698.
- [19] 赵惊涛,彭苏萍,陈宗南,等.煤矿隐蔽致灾地质体地震绕射波探测方法[J].矿业科学学报,2022,7(1):1-8.
- ZHAO Jingtao, PENG Suping, CHEN Zongnan, et al. Seismic diffraction detection method for geological hidden disasters in coal mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1):1-8.
- [20] 彭苏萍,赵惊涛,盛同杰,等.煤田绕射地震勘探现状与进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):1-20.
- PENG Suping, ZHAO Jingtao, SHENG Tongjie, et al. Status and advance of seismic diffraction exploration in coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1):1-20.

(责任编辑:陈骏)