



移动扫码阅读

彭 凡,杜文凤,刘洪栓.基于地震多属性融合技术的煤层巷道探测识别方法[J].煤炭科学技术,2021,49(6):235-241.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.028

PENG Fan, DU Wenfeng, LIU Hongshuan. Coal seam roadway identification method based on seismic multi-attribute fusion technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 235-241. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.06.028

# 基于地震多属性融合技术的煤层巷道识别方法

彭 凡<sup>1,2</sup>, 杜文凤<sup>1</sup>, 刘洪栓<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**常规地震属性解释方法利用单一属性,或多种属性单独解释、相互印证的方式来识别地下异常地质体。虽然在一定程度上能够满足勘探要求,但客观存在准确性不高的问题。为了准确查明地下煤层巷道的展布情况和边界范围,提出了基于地震多属性融合技术的煤层巷道探测识别方法。设计了地质模型,利用正演模拟研究了巷道的地震响应特征。巷道是一种处于煤层之中且与煤层有着共同顶底板岩层的特殊地质空腔体,一般充水或空气。由于与顶底围岩间存在的较大波阻抗差异而形成的强反射界面,会导致巷道处反射波能量出现局部变强的现象。从正演结果中提取多种煤层地震属性表明,相对波阻抗和振幅类属性可以很好的描述这种异常。沿目的煤层从实际地震数据中提取了相对波阻抗、瞬时振幅和平均振幅 3 种不同地震属性,将这 3 种地震属性视为 R、G、B 颜色分量,利用 RGB 色彩融合技术对这 3 种地震属性进行融合。利用含有 3 种地震属性信息融合后的属性,成功查明了煤层巷道的平面位置及其边界范围,说明利用地震多属性融合技术来识别巷道是行之有效的。结果表明,相较于单一地震属性,地震多属性融合后的属性可以展现出更丰富的地质信息,巷道及边界更为清晰和连续,提高了解释精度,为探测识别煤矿巷道提供了依据。

**关键词:**巷道识别;地震属性;多属性融合;RGB 融合

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)06-0235-07

## Coal seam roadway identification method based on seismic multi-attribute fusion technology

PENG Fan<sup>1,2</sup>, DU Wenfeng<sup>1</sup>, LIU Hongshuan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Conventional seismic attribute interpretation method uses single seismic attribute, or multiple seismic attributes to separately interpret and verify each other to identify subsurface anomalous geological bodies. Although it can meet the exploration requirements to a certain extent, the accuracy is unsatisfactory. In order to accurately identify the distribution and boundary of the coal seam roadway, an interpretation method based on seismic multi-attribute fusion technology is proposed. A geological model was designed, and its seismic response characteristics were studied. A roadway can be regarded as a special geological hollow body that is in the coal seam and has the common top and bottom rock formation with the coal seam. Generally, the roadway is filled with water or air. The strong reflection interface formed due to the obvious impedance difference between the roadway and the surrounding rock will lead to the phenomenon that the reflected wave energy at the roadway becomes stronger locally. Extracting a variety of seismic attributes from the forward results showed that the relative acoustic impedance and amplitude attributes can well describe the seismic reflection anomalies caused by the roadway. Three different seismic attributes including relative acoustic impedance, instantaneous amplitude and mean amplitude were extracted from the seismic volume along the target coal seam. These three seismic attributes were regarded as R, G, and B color components, respectively, and fused by RGB color fusion technology to obtain a fusion attribute including three seismic attribute information. The position and boundary of the coal

收稿日期:2020-11-16;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066-001)

作者简介:彭 凡(1994—),男,河北邢台人,硕士研究生。E-mail: cumtbp@163.com

通讯作者:杜文凤(1963—),女,吉林扶余人,教授,博士生导师,博士。E-mail: duwf66@126.com

seam roadway was found out successfully by using the fused attributes, which showed that it is effective to use seismic multi-attribute fusion technology to identify roadway. The results showed that, compared with the single seismic attribute, the attribute after the fusion of multiple seismic attributes can show more geological information, and the roadway and its boundary were clearer and more continuous, which improved the interpretation accuracy and provided a basis for detecting and identifying coal mine roadway.

**Key words:** roadway identification; seismic attribute; multi-attribute fusion; RGB fusion

0 引言

20 世纪 80 年代,小煤窑私采偷采现象普遍,由于受当时的经济、技术等条件限制,常采用房柱式或巷道式方法开采<sup>[1-2]</sup>。由于缺少采掘资料,其开采范围已无从可知,留下的采空巷道会对后续矿山生产建设产生很大安全隐患,因此,需要查明采空巷道范围以保障后续煤矿的安全开采<sup>[3-5]</sup>。关于常规采空区的探测识别研究工作已经做了很多<sup>[6-8]</sup>,而对采空巷道识别的研究相对较少。地球物理技术是探测地下情况的有效手段,电法非常适合用于检测含水性,但是探测深度相对较浅<sup>[9]</sup>;探地雷达探测深度浅,但可以达到很高的精度<sup>[10]</sup>;三维地震方法探测深度深,是应用最广的方法<sup>[11]</sup>。张爱敏等<sup>[12]</sup>首次提出利用三维地震技术,根据巷道反射波特征可以直接在时间剖面上识别出巷道。程建远等<sup>[13]</sup>认为地震水平切片是探测巷道的有效手段,由于巷道断面小,只有在“三高”地震资料上才能识别出巷道<sup>[13]</sup>。朱红娟<sup>[14]</sup>在常规地震解释的基础上,利用地震属性对巷道做了定位解释。

巷道本身由于断面较小,探测识别难度大,提高地震技术识别精度是急需解决的问题。基于此,首先通过建立地震正演模型研究了巷道的地震响应特征,正演结果表明地震属性可以很好地识别出巷道产生的异常。然后从实际地震数据中提取了相对波阻抗、瞬时振幅和平均振幅 3 种不同地震属性,利用 RGB 融合技术对这 3 种属性进行融合,利用融合属性成功探测识别出了巷道的平面位置和边界范围,为巷道的精细探测识别提供理论及实例依据。

1 巷道地震响应特征

1.1 地质模型设计

为了研究采空巷道的地震响应特征,参考研究区各煤层的实际深度和厚度,设计了二维地震正演地质模型。正演地质模型如图 1 所示,为便于直观了解模型,对煤层及巷道做了一定程度的放大处理,模型的实际参数见表 1。模型长 1 000 m,深 1 000 m,共设计 3 层煤,从浅到深依次为 3 煤、9 煤和 15 煤。其中,3 煤深度为 500 m,厚度为 4 m;9 煤

深度为 550 m,厚度为 5 m;15 煤深度为 600 m,厚度为 5 m。3 煤中设计有 2 条宽为 5 m,高为 4 m 的巷道,两条巷道间距 90 m。巷道 1 充满空气,位于水平方向 455 m 处;巷道 2 充填地下水,位于水平方向 545 m 处。

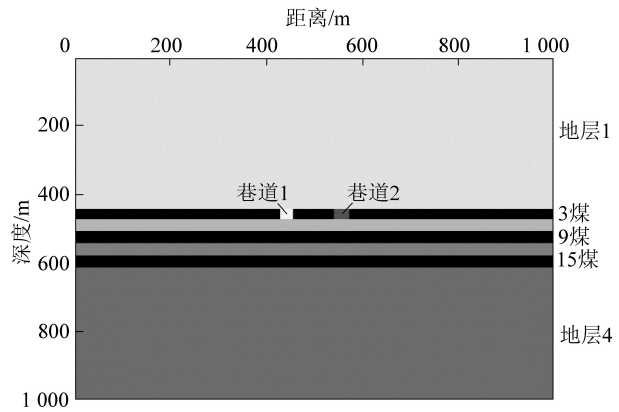


图 1 正演地质模型  
Fig.1 Forward geological model

表 1 地质模型参数

Table 1 Geological model parameters			
地层(介质)	震波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	厚度/m
地层 1	2 500	1 900	496
3 煤	2 100	1 400	4
巷道 1(空气)	300	1.29	4
巷道 2(水)	1 500	1 000	4
地层 2	2 900	2 400	45
9 煤	2 200	1 500	5
地层 3	3 100	2 500	45
15 煤	2 300	1 600	5
地层 4	3 300	2 600	400

为快速获取模型的正演结果,采用声波方程正演模拟方法,正演结果如图 2 所示。图 2a 为正演地震剖面,可以看到两处巷道位置处的 3 号煤层反射波出现较明显的局部振幅增强现象,而巷道下方的煤层反射波出现局部振幅减弱现象。并且由于填充物不同,地震波振幅增强或减弱的幅度也不同。相比而言,在填充空气的巷道 1 处振幅的变化明显,而填充水的巷道 2 处振幅的变化较弱。

为了更直观地说明这种振幅上的变化,分别沿各煤层提取了地震振幅属性,如图 2b 所示,从上到下依次为 3、9 和 15 煤的振幅属性。从振幅属性上能够看到更直观清晰的振幅异常现象,3 煤巷道处

的振幅明显变大,填充空气巷道的异常比填充水巷道的增大幅度更大,而巷道下方的煤层反射同相轴出现振幅减弱的情况。

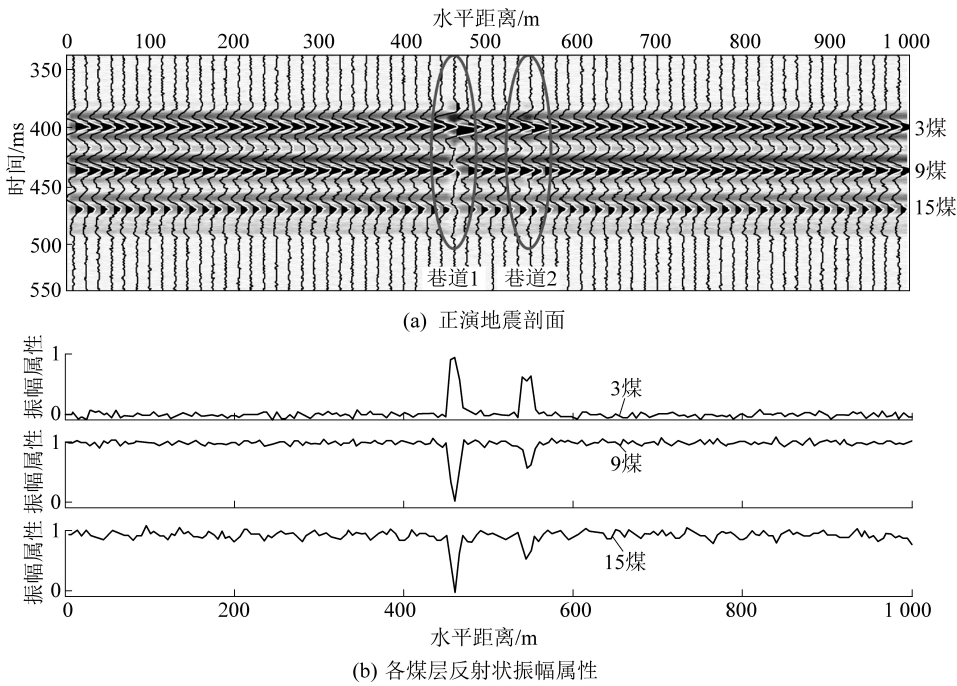


图 2 正演模拟结果  
Fig.2 Forward results

1.2 正演结果分析

对于常规采空区来说,顶部围岩会在上覆岩层压力作用下逐渐坍塌陷落。相比于完整围岩,塌陷后的采空区变得松散、密实度降低,形成杂乱、松散的特殊地质体<sup>[15]</sup>。由于不会形成明显的波阻抗界面,所以在剖面上多表现出同相轴不连续、错乱且反射能量弱等特点。而对于巷道或巷道采空区来说,由于巷道断面小,其顶板在相对较长时间内不会垮塌,巷道内常被地下水或空气充填。从垂直方向上看,巷道可认为是处于煤层之中并且与煤层有着共同顶底板岩层的特殊地质空腔体。由于存在有明显的波阻抗界面,这种情况下能够形成明显的反射波,其反射振幅可通过反射系数来进行分析。

反射系数定义为反射波振幅与入射波振幅的比值,可以用式(1)来进行计算<sup>[15]</sup>,即

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \tag{1}$$

式中: $R$  为反射系数; $\rho_1$ 、 $v_1$  分别为反射界面上部介质的密度和速度, $\rho_2$ 、 $v_2$  分别为反射界面下部介质的密度和速度;密度和速度的乘积为波阻抗,反射系数为负值时表明反射波与入射波极性相反。

根据式(1)和表 1 中的介质参数计算出各主要

反射界面的反射系数,结果见表 2。由反射系数定义可知,当入射波振幅不变时,界面的反射系数越大,则反射波的振幅也就越大。无论是空气还是水,密度和速度都远小于煤层,其与围岩界面的反射系数大于正常赋存煤层与围岩界面的反射系数,所以由此界面产生的反射波的振幅会大于正常反射波振幅,在剖面上表现出同相轴振幅增大、能量增强的现象。并且,由于空气与巷道界面的反射系数大于地下水与巷道界面的反射系数,所以巷道 1 比巷道 2 的反射波振幅更大。

表 2 主要界面的反射系数			
Table 2 Reflection coefficients of main interfaces			
界面	煤层-围岩	空气-围岩	水-围岩
反射系数	0.406	0.999	0.645

由正演结果(图 2)还可知,巷道下方煤层产生的反射波出现有振幅减弱现象,这是由于巷道的屏蔽作用引起的。由反射系数定义易知,低速低密度地层会与围岩形成强反射界面,导致大部分入射能量会被反射回去,而能够透过界面继续向下传播的能量就会大幅减少,导致下方地层的反射波能量降低,该现象为反射型能量屏蔽现象<sup>[17]</sup>。由于巷道处形成的强反射界面的屏蔽作用阻碍了地震波继续向



下传播,这就使巷道下方煤层成为了“被屏蔽”区,导致在剖面上下方煤层的同相轴振幅减弱。该现象增加了解释人员将其错误解释成地质构造的可能性,但如果解释人员能够识别出巷道并且认识到这是由于巷道屏蔽引起的,那么在解释过程中就能够减少甚至避免这种错误解释的可能性。

由于巷道断面尺寸较小,反映在剖面上巷道引起的振幅异常幅度不明显容易被忽略,但是利用地震属性却能够直观且清晰的识别出这种异常。地震属性是识别地下异常地质体的有效手段,并且,由于巷道本身分布的规律特点,其在平面上更容易识别,因此利用地震属性解释方法来识别巷道是可行的。为避免单一属性解释精度不高,难以全面反映地下地质问题,考虑采用地震多属性融合方法来进行巷道的识别探测。

图3展示了沿目的煤层从正演结果中提取的不同地震属性,从上到下依次为相对波阻抗属性、瞬时振幅属性以及瞬时频率属性。相对波阻抗属性用来描述地层的相对波阻抗大小,能够很好地识别出巷道引起的波阻抗变化;振幅类属性对地下异常地质体有良好的反映,能够很好地识别出巷道产生的异常;频率属性虽然也可以识别出巷道,但对于不同填充介质的巷道却有着近乎相同的异常特征。所以在进行多属性融合时可以优先考虑相对波阻抗和振幅类的属性。

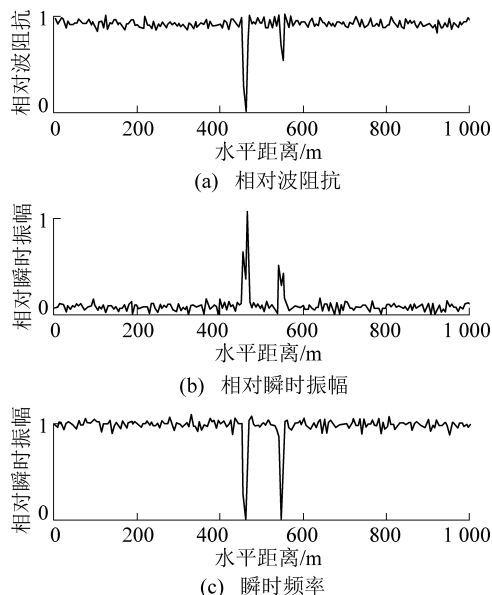


图3 目的煤层地震属性

Fig.3 Seismic attributes of target coal seam

## 2 地震多属性解释

地震属性是由地震数据经过一定的非线性数学

变换得到的关于地震波几何学、运动学、动力学以及统计学特征的度量。众所周知,地下介质的变化会引起地震属性发生相应的变化,因此利用地震属性研究地下异常地质体是可行的。地震属性能够描述地下某些地质现象,如河道、断层或断裂、岩性变化以及储层变化等,广泛应用于构造解释、地层解释、岩性解释和模拟以及储层描述等多个方面<sup>[18]</sup>。

目前,针对各种不同地质任务提出的地震属性达到上百种之多<sup>[19]</sup>。根据使用的数学变换算法不同,得到的地震属性也就不同。地震属性能用来凸显地质体的某些特殊地质学特征,并在一定程度上辅助地震解释工作。然而,单一属性信息量少,通常不能全面反映地质体特征,存在多解性可能导致片面结果;利用多种属性单独解释、相互印证的方式,工作量变大且难以得到统一的结果<sup>[20]</sup>。因此,需要1种联合多种属性的解释方法。

目前用到的地震多属性解释方法一般可分为以下3种:

1)多属性叠合方法。这是过去常用的多属性解释方法,通过将多种地震属性图像一张张地叠合在一起,进行分析和解释工作。

2)多属性组方法。主要用于2种属性的情况。首先为一种属性选取一个阈值,然后将该属性小于阈值的位置显示为另一种属性,通过这种方法将2种属性组合起来。

3)多属性融合方法。该方法能够将多种属性融合为一种新的属性,融合后的属性同时包含参与融合的多种原始属性中的信息。

RGB色彩融合方法是常用的地震多属性融合方法,可用于3种地震属性融合。其思路是选取3种地震属性,分别将这3种属性视为红、绿、蓝(RGB)3个颜色分量,然后在RGB颜色空间将这3种属性融合为1种属性,最后利用融合后的属性图像进行地震解释。通过利用这种方法可以克服单一属性的局限性,提高地震解释的精度。

## 3 应用实例

### 3.1 研究区概况

研究区位于沁水盆地北部含煤地层稳定,地层平缓。由浅到深,区内主要有3、9、15煤。其中,3煤深度为366~660 m,平均厚度为2.58 m;9煤深度为418~688 m,平均厚度为4.10 m;15煤深度为484~766 m,平均厚度为4.32 m。在三维地震数据采集之前,沿3煤层已开拓部分主要巷道,为研究提供了基础。



### 3.2 实例分析

从叠前时间偏移地震数据中沿 3 煤提取了相对波阻抗、瞬时振幅和平均振幅 3 种地震属性。相对波阻抗属性可以用来描述地层的相对波阻抗大小,适合用于描述地层变化情况;振幅类属性计算稳定性好,对地下异常地质体有良好的反映,能够用来刻画地质体边界。

各种属性量纲不同,在进行属性融合之前需要进行标准化处理,由于 RGB 图像的颜色分量取值在 0~255,所以需要利用式(2)将每种属性的取值标准化到 0~255。

$$Z = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \times 255 \quad (2)$$

式中: $Z$  为标准化后的属性值; $X$  为原始属性值; $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为原始属性的最大值和最小值。

标准化处理之后,进行 RGB 属性融合。由排列组合知识易知,3 种属性的不同排列顺序共有 6 种,图 4 给出了这 6 种不同排列顺序的属性融合结果。由图 4 知,不同顺序属性融合效果相差不是很大。最终选择将相对波阻抗属性视为红色分量 R,瞬时振幅属性视为绿色分量 G,平均振幅属性视为蓝色分量 B。在 RGB 色彩空间对这 3 种属性进行融合,得到最终融合属性。

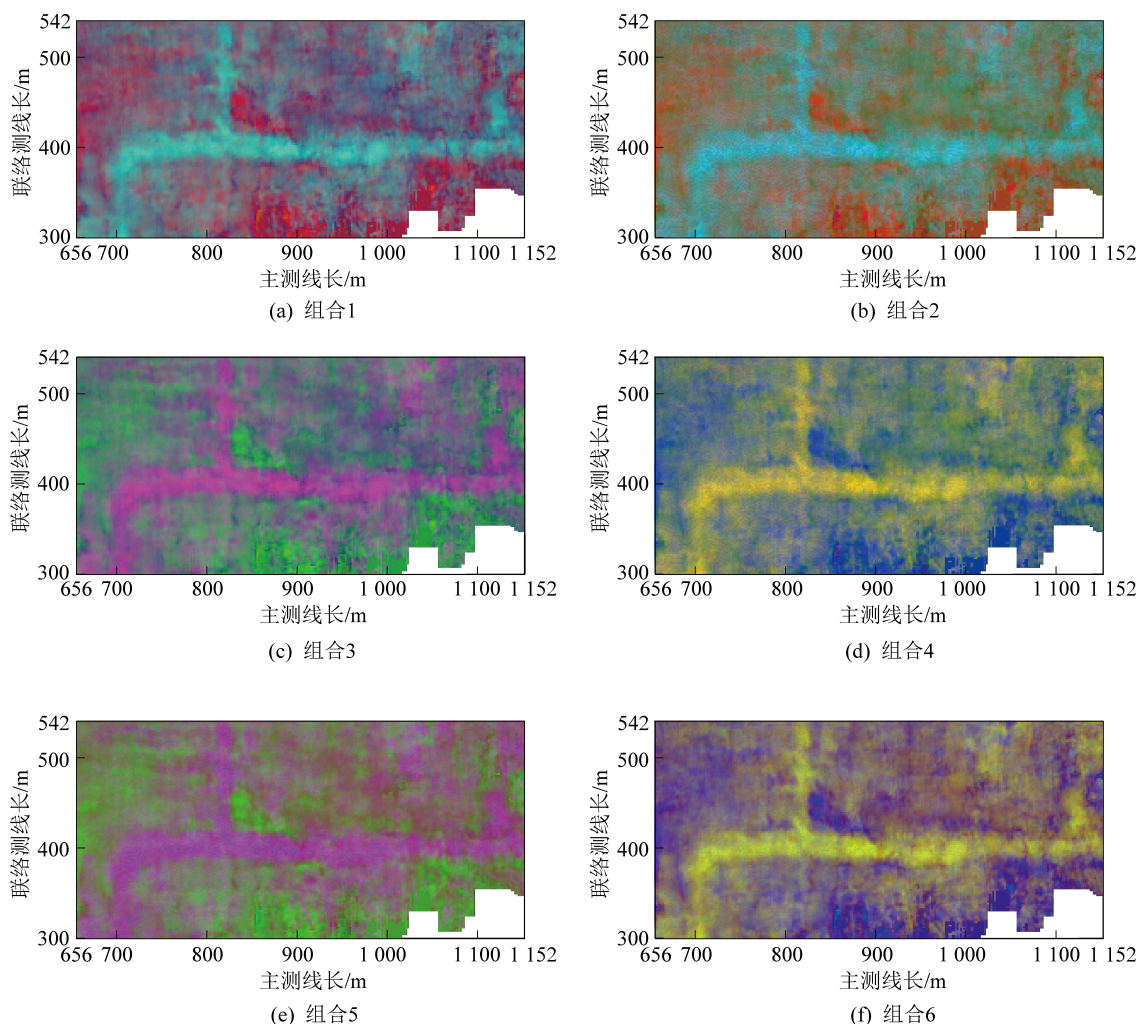


图 4 不同 RGB 顺序融合结果

Fig.4 Different RGB sequence fusion results

图 5 展示了研究区地震多属性融合结果,图 5a 为相对波阻抗属性,图 5b 为瞬时振幅属性,图 5c 为平均振幅属性,图 5d 为融合后的属性。由图 5 知,虽然 3 种原始属性都能大致显示出条带状巷道,但整体上巷道较为模糊且边界断断续续不能连续追踪。如图 5a 相对波阻抗属性在区内东部基本上不能识别出巷道的边界;而在图 5b 和图 5c 中,区内南部和东部的

巷道断断续续,不能连续追踪。而经过多属性融合后,在图 5d 融合后的属性中巷道表现更为连续,边界也更清晰,很容易刻画出巷道边界和延伸范围。

图 6 为利用融合属性进行巷道识别的结果与巷道的实际位置对比,图 6a 为识别结果,图 6b 为实际位置。由图 6 知融合属性识别出的结果与实际巷道展布范围和边界位置对应十分准确。由于巷道之间

的距离较小(东西向巷道间距为25 m,南北向巷道间距为40 m),反映在地震属性上会叠加成更宽的条带异常。对于单个巷道来说,由于没有相邻巷道

做叠加,其异常条带较弱,相对而言较难准确分辨出其位置。最终结果表明,多属性融合技术能够成功识别出巷道的平面位置及其边界范围。

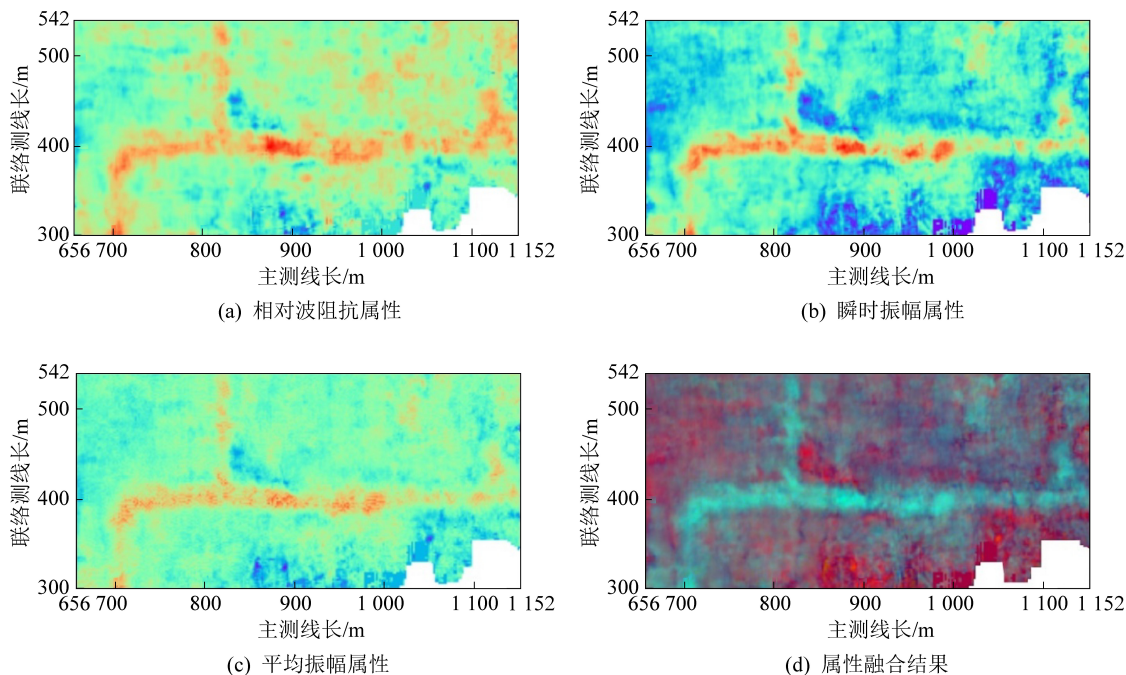


图5 地震多属性融合结果

Fig.5 Results of seismic multi-attribute fusion

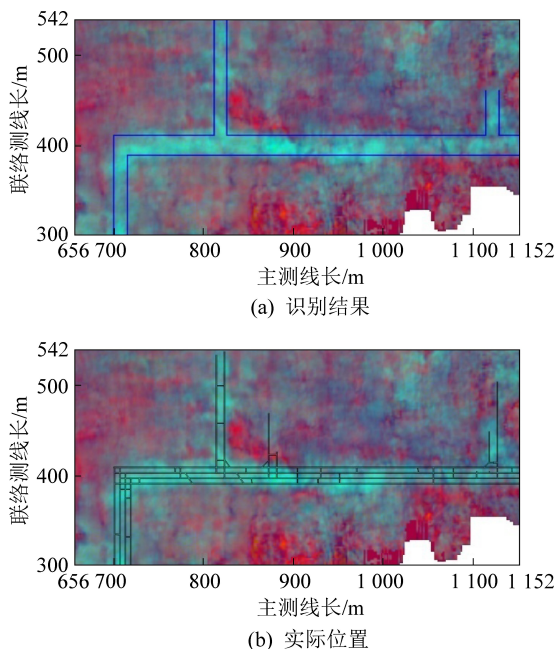


图6 巷道识别结果与实际位置对比

Fig.6 Roadway identification result and actual position

## 4 结 论

1)煤层巷道采空是特殊地质空腔体并与其顶底围岩形成强反射界面,引起所在煤层地震属性发生变化,利用这种异常变化可以识别出巷道采空的

位置及边界范围。

2)相对波阻抗、振幅和频率属性都能够很好地反应出巷道产生的异常变化,但对于不同的填充物前两者的变化幅度也不相同,而频率属性分不出来这种不同。

3)RGB多属性融合技术能够综合多种属性的信息,相比于单一属性,融合后的属性可以展现出更丰富的地质信息,提高解释精度,显示出更为清晰、连续的巷道边界范围。

## 参考文献(References):

- [1] 解兴智.浅埋煤层房柱式采空区顶板-煤柱稳定性研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):1-4,9.  
XIE Xingzhi. Study on stability of roof-coal pillar in room and pillar mining goaf in shallow depth seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 1-4, 9.
- [2] 徐忠和,赵阳升,高红波,等.旧采残煤综合机械化长壁复采的几个问题[J].煤炭学报,2015,40(S1):33-39.  
XU Zhonghe, ZHAO Yangsheng, GAO Hongbo, et al. Several problems of the old mining remnants in longwall fully mechanized mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 33-39.
- [3] 李文,牟义,张俊英,等.煤矿采空区地面探测技术与方法优化[J].煤炭科学技术,2011,39(1):102-106.  
LI Wen, MU Yi, ZHANG Junying, et al. Optimization of surface de-

- tection technology and method of mine goaf[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 102-106.
- [4] 王 昕, 翁明月. 特厚煤层小煤矿采空区探测与充填复采技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 41-44.  
WANG Xin, WENG Mingyue. Prediction and backfill mining technology of ultra thick seam in goaf of small mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 41-44.
- [5] 息金波, 杨 光. 小煤矿采空区遗煤复采技术研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(9): 11-14.  
XI Jinbo, YANG Guang. Repeated mining technology for residual coal in goaf of small coal mines[J]. Coal Engineering, 2015, 47(9): 11-14.
- [6] 覃 思, 程建远, 胡继武, 等. 煤矿采空区及巷道的井地联合地震超前勘探[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 636-639.  
QIN Si, CHENG Jianyuan, HU Jiwu, *et al.* Coal-seam-ground-seismic for advance detection of goaf and roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 636-639.
- [7] 王晓平, 张新军. 瞬变电磁法及激电法在多层积水采空区探测中的应用研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(4): 71-74.  
WANG Xiaoping, ZHANG Xinjun. Application of transient electromagnetic method and polarization method in detection of multi-layered gob area[J]. Coal Technology, 2019, 38(4): 71-74.
- [8] 范 涛. 孔巷瞬变电磁源定接收方法探测采空区试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3229-3238.  
FAN Tao. Experimental study on the exploration of coal mine goaf by dynamic source and fixed reception roadway-borehole TEM detection method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3229-3238.
- [9] 李清林, 谢汝一, 王兰甫, 等. 应用电阻率层析成像探测采空区斜风井巷道稳定性计算[J]. CT理论与应用研究, 2005, 14(3): 1-7.  
LI Qinglin, XIE Ruyi, WANG Lanfu, *et al.* Resistivity tomography and calculation of stability in surveying excavated-empty-area and inclined shaft tunnels in coal mine [J]. CT Theory and Applications, 2005, 14(3): 1-7.
- [10] 程久龙, 胡克峰, 王玉和, 等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(S1): 79-82.  
CHENG Jiulong, HU Kefeng, WANG Yuhe, *et al.* Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1): 79-82.
- [11] 薛国强, 潘冬明, 于景邨. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 427-432.  
XUE Guoqiang, PAN Dongming, YU Jingcun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 427-432.
- [12] 张爱敏, 刘天放, 李海山. 高分辨率三维地震勘探对巷道反射波的检测[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(5): 48-53.  
ZHANG Aimin, LIU Tianfang, LI Haishan. Detection of gateway reflection wave using high resolution 3-D seismic exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(5): 48-53.
- [13] 程建远, 孙洪星, 赵庆彪, 等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 251-255.  
CHENG Jianyuan, SUN Hongxing, ZHAO Qingbiao, *et al.* The detection technology of excavated region in coal and case study[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 251-255.
- [14] 朱红娟. 三维地震属性解释技术在巷道探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4): 90-93.  
ZHU Hongjuan. Application of 3D seismic attribute interpretation technology in the detection of roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4): 90-93.
- [15] 刘菁华, 王祝文, 朱 士, 等. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 715-719.  
LIU Jinghua, WANG Zhuwen, ZHU Shi, *et al.* The geophysical exploration about exhausted area and sinking area in coalmine [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 715-719.
- [16] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2009: 32.
- [17] 杨庆道, 王伟峰, 尹以东, 等. 能量屏蔽作用的类型及形成机制及应对方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 44-50.  
YANG Qingdao, WANG Weifeng, YIN Yidong, *et al.* Types of energy shielding effect, formation mechanism and countermeasures [J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science), 2011, 35(5): 44-50.
- [18] 王开燕, 徐清彦, 张桂芳, 等. 地震属性分析技术综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 815-823.  
WANG Kaiyan, XU Qingyan, ZHANG Guifang, *et al.* Summary of seismic attribute analysis[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 815-823.
- [19] 李占东, 张丽双, 李 阳, 等. 基于多次迭代属性融合技术的河道砂刻画: 以大庆油田扶余油层 Z 区为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 229-236.  
LI Zhandong, ZHANG Lishuang, LI Yang, *et al.* Channel sand characterization based on the fusion of multiple iterative attributes: a case study of area Z of Fuyu oil layer in Daqing Oil-field[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1161-1168.
- [20] 王彦仓, 秦凤启, 杜维良, 等. 地震属性优选、融合探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(6): 69-73.  
WANG Yancang, QIN Fengqi, DU Weiliang, *et al.* Discussions on optimization and fusion of seismic attributes[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(6): 69-73.