



煤炭学报

Journal of China Coal Society

ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目：基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用
作者：袁峰，申涛，谢晓深，马丽，汶小岗
网络首发日期：2020-10-23
引用格式：袁峰，申涛，谢晓深，马丽，汶小岗. 基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用. 煤炭学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20201022.1716.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0902>

基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用

袁 峰^{1,2}, 申 涛³, 谢晓深⁴, 马 丽¹, 汶小岗^{1,2}

(1、国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710026; 2、陕西省煤田物探测绘有限公司, 陕西 西安 710005; 3、陕西省地质调查院, 陕西 西安 710065; 4、西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 导水裂隙带发育高度是“保水采煤”的基础参数, 准确揭示导水裂隙带发育规律有助于实现保水开采。三维地震技术具有数据横向连续、纵向分辨率较高的特点, 在一定程度上能够弥补钻孔资料的不足。为了研究陕北某煤矿不同开采阶段导水裂隙带发育范围及其演化规律, 以该矿 30101、30102 工作面为研究对象, 采用以漏失量为监督数据的深度前馈神经网络方法融合多种地震属性对研究区分层开采全垮落式采动损害导水裂隙带发育高度进行探测。首先, 在钻孔冲洗液漏失量观测数据分析的基础上, 优选地震属性, 并进行有监督的深度学习; 然后, 融合多种属性信息建立裂隙模型, 利用裂隙模型分析确定采动覆岩结构破坏和导水裂隙带的三维空间范围、形态特征、垂向岩石破坏程度及导水裂隙带发育高度; 最后, 通过分析两个工作面的开采时间差异, 揭示导水裂隙的发育、闭合规律。研究表明 30101 工作面裂隙带发育最大高度为 120m, 30102 工作面裂隙带发育最大高度为 133m, 以高角度裂隙为主, 主要沿垂直、平行工作面方向发育。导水裂隙带的裂隙发育是先增大后降低, 裂隙带上部裂隙闭合较好, 裂隙带下部和工作面边缘裂隙闭合较差, 采动后 18 个月裂隙比采动后 4 个月减少了 21%, 离层裂隙减少了 50%。通过本次研究认为基于深度学习的地震属性融合技术对煤层采动引起的岩层破坏规律探测具有针对性, 其精度能满足生产需要, 费用低, 是一种有效探测技术。因受原始资料所限, 本文只采用漏失量数据进行深度学习, 而今后研究中, 可也从其他更好表征裂隙的数据如裂隙密度数据入手, 进行深度学习研究, 提高预测精度。

关键词: 深度学习; 多属性融合; 导水裂隙带; 煤炭开采

Application of deep learning-based seismic multi-attribute fusion technology in the detection of water conducting fissure zone

YUAN Feng^{1,2}, SHEN Tao³, XIE Xiaoshen⁴, MA Li¹, WEN Xiaogang^{1,2}

责任编辑: 韩晋平

基金项目: 陕西省技术创新引导专项基金(2019CGHJ-20); 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室开放基金(DZBZ2020-01); 陕西煤业化工集团科研基金资助项目(2018SMHKJ-B-J-24)资助

作者简介: 袁峰(1984—), 男, 湖北十堰人, 高级工程师。Tel: 17702902852, E-mail: 249251661@qq.com

Abstract: The height of water-conducting fractured zone is a basic parameter for the study of water-preserved coal mining. Accurately revealing the development law of water-conducting fracture zone is helpful to realize water-preserved coal mining. The three-dimensional seismic technology has the characteristics of horizontal continuity and high vertical data resolution. To a certain extent, the data was achieved by three-dimensional seismic technology, can compensate for the scarcity of the data was obtained by drilling. In order to study the scale and the law of evolution of water-conducting fracture zone at different mining stages, the 30101 working face and 30102 working face in a coal mine which lie in northern Shaanxi, were taken as objects. the neural network method of depth feeder with leakage as monitoring data was used to detect the development height of water-conducting fracture by coal mining in the study area. First of all, combined with drilling fluid data, the deep learning of seismic properties which were selected by analyzing the drilling fluid data were carried out. Then, the fracture model is established by merging various attribute information, and the three-dimensional spatial range, morphological characteristics, vertical rock failure degree and development height of water-conducting fracture zone are determined by the model. Finally, the laws of development and closure of the water conductive fracture are inferred through analyzing the mining time different between the two working faces. The research shows that the maximum height of fracture zone in 30101 working face is 120m, and that of 30102 working face is 133m. Fractures with high-angle development in water-conducting fracture zone along the vertical and parallel working face direction. The fracture development in the water-conducting fracture zone increases first and then decreases, the fracture closure in the upper part of the fracture zone is better, and the fracture closure in the lower part of the fracture zone and the edge of the working face is worse. The number of fractures in 18 months after mining is reduced by 21% compared with that in 4 months after mining, and the number of fractures in separation layer is reduced by 50%. Through this study, Deep learning-based seismic attribute fusion technology is an effective detection technology, which is intended to detect the law of damage caused by rock formation caused by coal mining, and its accuracy can meet production needs. Due to the limitation of the original data, this paper just uses the leakage data for deep learning, however, in the future research, other data characterizing the fracture characteristics, such as fracture density data, can be used to improve the prediction accuracy. by conducting deep learning research.

Key words: Deep learning; Multi-attribute fusion; Water diversion fracture zone ; Coal mining

煤层开采形成的采空塌陷会造成地表含水层水流失、溃沙等灾害^[1-5]。采空区中导水裂隙带是否发育到地表和含水层对保水采煤至关重要。因此,有必要对导水裂隙带的发育高度进行精确探测^[6-7]。

目前,国内外导水裂隙带的探测方法主要有钻孔冲洗液观测法、井下钻孔注水法、相似材料模拟、钻孔电视法等,探测成本较高,探测结果仅为离散的钻孔资料,孔间推测存在误差^[8-10]。三维地震技术

具有数据横向连续、纵向分辨率较高的特点,在一定程度上能够弥补钻孔资料的不足^[11-12]。

导水裂隙带探测的核心是裂隙识别。目前,常用于裂隙识别的地震属性归纳起来可分为:波形相似类,包括相干体、边缘检测和方差体等;构造几何类,包括曲率属性、倾角属性等;吸收衰减类,包括振幅属性、频率属性和频谱属性等^[13-14]。对同一物探手段来说,在实际生产中需要根据其适宜性和有效性进行选择,但无论采用何种解释方法,都

存在多解性。综合以往技术实践可以看出,利用多种解释方法进行综合解释,可以提高解释的精度和可靠性。

本文采用以漏失量为监督数据的深度学习方法融合多种地震属性对导水裂隙带发育情况进行探测。首先,在钻孔冲洗液漏失量观测数据分析的基础上,优选地震属性,结合钻孔冲洗液漏失量观测数据进行有监督的深度学习,融合多种属性信息建立裂隙模型,利用裂隙模型分析确定采动覆岩结构破坏和导水裂隙带的三维空间范围、形态特征、垂向岩石破坏程度定量变化特征及导水裂隙带发育高度,并结合两个工作面的开采时间差异性推断导水裂隙的发育、闭合规律。

1 研究区概况及勘探方案

研究区位于陕北黄土高原北端,毛乌素沙漠东南缘地带,地形相对平坦,地貌类型主要为风沙滩地地貌。主采3号煤层,3号煤层全区可采,区内可采煤层厚度9.8~10.2m,煤层由东南向西北缓倾,倾角约0.5°。该煤层属厚煤层,采用复合假顶综合机械化采煤法开采,全垮落式管理顶板,分层开采上分层煤层留底煤,开采厚度为5m。3号煤层底板标高+1100~+1110m,煤层埋深250~260m,顶板岩性以中粒砂岩为主。研究区位于30101工作面中段,根据采掘资料,30101工作面煤层已经全部采空,该工作面宽300m,与其西侧相邻的30102工作面,也已开采完毕,探测范围的选择思路是一方面保证完全覆盖30101、30102工作面,另一方面保证完全覆盖冒落、裂隙及变形带,最终确定探测区为规则矩形,横向长1000m,纵向宽500m,探测区面积0.50km²,如图1所示,图中蓝色范围为三维地震工作范围。30101、30102工作面开采时间不同,30101工作面煤层采掘距本次野外数据采集时间超过18个月,30102工作面采掘距本次野外数据采集时间仅4个月。三维地震工作的同时,在沿30101工作面走向中心位置布置一条倾向剖面线A,在该剖面线上布置4个钻孔(H1、H2、H3、H4号钻孔)。对照钻孔(H1、H2)布置在30101工作面回风顺槽东未采动区;为了查明导水裂隙带沿工作面倾向的高度变化特征,在距30101回风顺槽外边界以内25m处布置一个H3号钻孔;为了查明导水裂隙带

最大高度,在30101工作面中心位置布置一个H4号钻孔。所有钻孔均进行抽水试验、冲洗液漏失量观测。

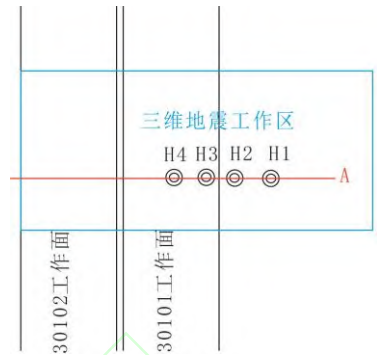


图1 研究区位置

Fig.1 Position of study area

2 研究区地球物理特征

图2为A勘探线地震时间剖面。经人工合成记录标定,T_q为一组可连续追踪反射波,该波组标定为基岩面反射波,在地震时间剖面中用黄线表示。T_z为一组较连续反射波,该波组标定为直罗底反射波,在地震时间剖面中用橙线表示。T₃为一组连续性好,能量较强的反射波,该波组标定为3号煤层底板反射波,在地震时间剖面中用蓝线表示。

研究区地质构造简单,采动之前地震时间剖面主要由T_q、T_z、T₃等几组反射波构成,剖面以近水平同相轴为主。煤层采空后,其上覆岩石失去支撑而导致平衡破坏,应力重新分布,使上覆岩体产生变形、位移和破坏,形成冒落带、裂隙带和变形带,采空区内往往会表现出有别于正常地层表征的反射波场特征。

冒落带,岩层破碎、地层完全性被破坏,该带内岩层的波组动力学性质发生变化,波组错断、波形凌乱。冒落带中T₃反射波同相轴消失并伴有绕射波和各种散射。

裂隙带,地层破坏程度小于冒落带,地层完整性未被完全破坏,地层中发育的大小不一裂隙使地层连续性和地震反射波能量(如T_z波)均受到影响。地震波在裂隙带中传播后,各频率成分的能量

分布将发生变化,主要表现为反射波频率降低,为研究裂隙带发育提供了依据。裂隙带上部约 110ms 位置处反射波同相轴断续出现,虽有一定的能量,但连续性差,可以用来判断裂隙带发育最大高度。30102 工作面内裂隙带反射波呈杂乱状,该位置裂隙发育较为剧烈,对反射波的吸收也强烈;同一位置 30101 工作面有部分反射波发育,说明经历一定时间后,部分裂隙发生了闭合,减少了对反射波的吸收。

变形带属于韧性变形,波组连续性较好和能量较强(如 Tq 波)。从图 2 中可以看出,变形带底部相对煤柱位置出现反射波同相轴弯曲特征。

经以上分析,可以对采空区三带进行大致的划分,如图 2 所示。但单从剖面特征来判断导水裂隙带发育高度精度有限,不能满足生产的要求。

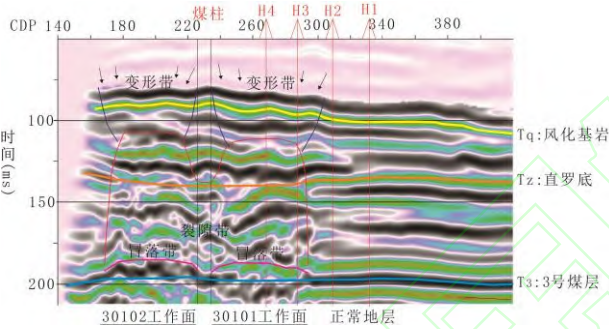
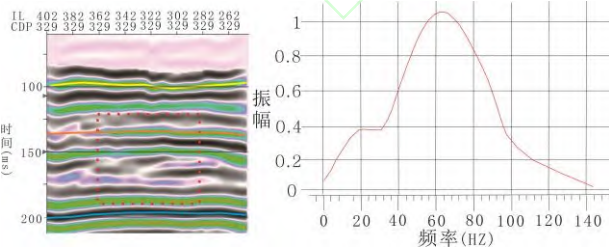


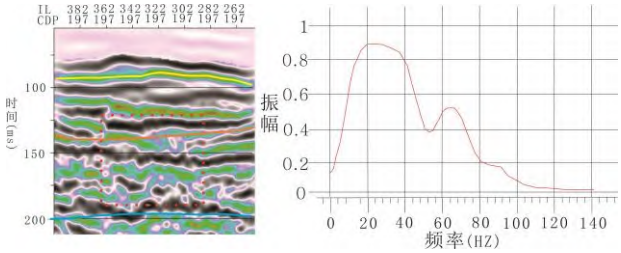
图 2 地震时间剖面(变密度显示)

Fig.2 seismic time profile

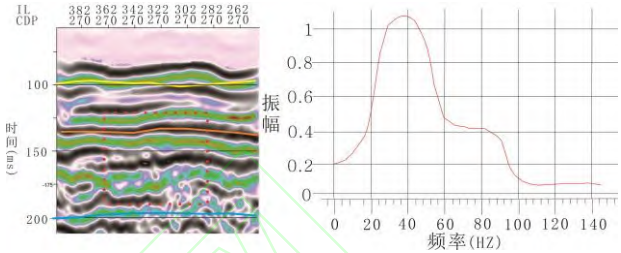
正常地层、30102 工作面(开采 4 个月)、30101 工作面(开采 18 个月)对应地层的反射波组特征是不一样的,其频率特征如图 3 所示。



A 正常地层地震时间剖面及频谱



B 30102 工作面地震时间剖面及频谱(开采 4 个月)



C 30101 工作面地震时间剖面及频谱(开采 18 个月)

图 3 采后不同时间裂隙带地震响应

Fig.3 Seismic response of fissure zone at different mining time

从图 3 可以看出,正常地层反射波主频 62Hz;当煤层采空后,裂隙带发育,对反射波高频成分吸收严重,开采 4 个月后反射波的主频变为 26Hz;采动 18 个月后,随着地层沉降、压实,部分裂隙闭合,减少了对反射波的吸收,反射波主频有所提高,变为 38Hz。

3 基于深度学习的地震多属性融合技术

3.1 研究思路

研究区测井资料受裂隙带影响,数据采集并不理想,导水裂隙带发育高度主要靠钻孔冲洗液漏失量观测确定,此为判断导水裂隙带发育高度的直接依据。从三维地震反射波特征来看,单从剖面特征来判断导水裂隙带发育高度较为困难。本文在钻孔、抽水试验、冲洗液漏失量观测等数据的基础上选择对裂隙变化敏感的地震属性,以冲洗液漏失量观测数据为监督样本,对三维地震频谱分解、相干、蚂蚁追踪等属性数据进行有监督的深度神经网络学

习，得到基于三维地震的精细裂隙模型对导水裂隙带发育情况进行预测，预测流程如图 4 所示。

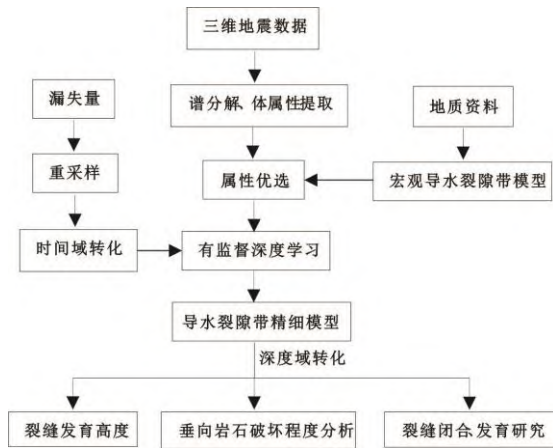


图 4 导水裂隙带预测流程图

Fig.4 Flow chart of Water diversion fracture zone prediction

3.2 地震属性提取、优选

目前，常用于裂隙预测的地震属性归纳起来可分为：波形相似类，包括相干体、边缘检测和方差体等；几何特征类，包括曲率属性、倾角属性等；吸收衰减类，包括振幅属性、频率属性和频谱属性等。

为了从各种地震属性中优选出与漏失量观测数据密切相关的地震属性，提取了井旁地震道的 15 种地震属性数据。利用公式：

$$r(\text{地震属性}, \text{漏失量}) = \frac{\text{Cov}(\text{地震属性}, \text{漏失量})}{\sqrt{\text{Var}[\text{地震属性}] \text{Var}[\text{漏失量}]}}$$

求取地震属性与漏失量之间相关系数，选择与漏失量相关性较好的属性。表 1 为地震属性与漏失量相关系数。从表 1 可见地震属性与漏失量相关系数最大者为相干属性，相关系数达 0.54，而最小者为方位倾角，相关系数仅为 0.04。

表 1 地震属性与漏失量相关系数

地震属性	相关系数	地震属性	相关系数
相干体	0.54	均方根振幅	0.32
地层倾角	0.37	瞬时带宽	0.19
最大曲率	0.44	方差体	0.24
谱分解 30Hz	0.48	瞬时相位	0.09
蚂蚁体	0.50	混沌体	0.25
瞬时振幅	0.39	甜点	0.14
瞬时频率	0.40	边缘检测	0.22
方位倾角	0.04		

根据不同属性的特点及与漏失量的相关性，提取相干体属性、地层倾角属性、最大曲率属性、谱分解 30Hz 数据体、蚂蚁体、瞬时振幅属性、瞬时频率进行裂隙预测，地震属性如图 5 所示，从图中可以看出，不同地震属性对裂隙所表现的敏感程度是不同的。

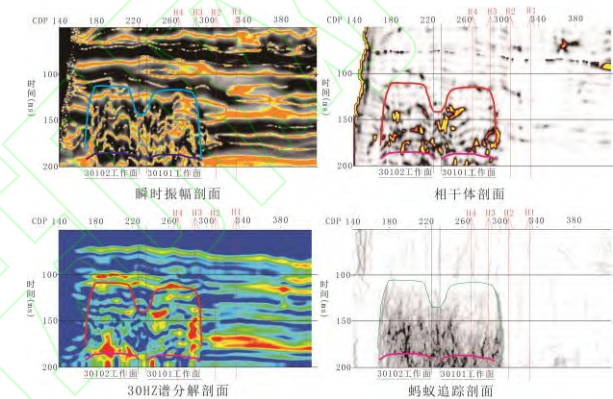


图 5 地震属性剖面

Fig.5 Seismic attribute profile

3.3 深度学习地震多属性融合技术

由表 1 可以看出，单一地震属性与钻孔冲洗液漏失量的相关性较低，为了更好地研究裂隙，本次采用深度前馈神经网络（DFNN）技术进行属性融合。

深度前馈神经网络模型是一种典型的深度学习模型^[15-17]。其目的是当某个近似函数 f 信息经过 x 的函数，定义 f 期间的计算过程，最终到达输出 \hat{y} 。模型的输出与模型自身没有反馈连接，如图 6 所示。输入训练样本为 7 维列向量

$T[X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7]$ ，其表示为地震属性。训练过程中，对输入训练数据和经过神经元输出的结果，采用 Xavier 方法初始化，随机产生对应的权

重系数 w 和偏置项 b 。

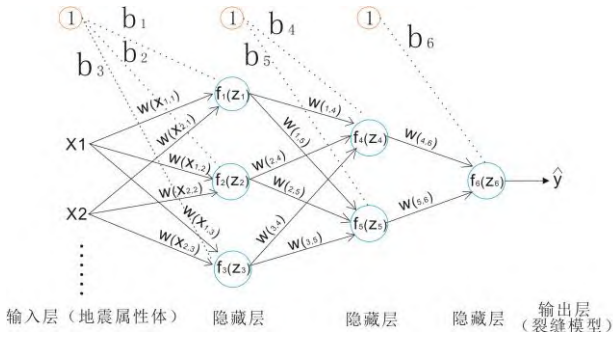


图6 DFNN 的工作流程示意图

Fig.6 DFNN schematic workflow

神经元由一个非线性 Sigmoid 逻辑函数构成，其表达式为：

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

在向前传播的过程中，数据以加权平均和的形式作为逻辑函数输入到第一个隐藏层中的神经元中。第一个隐藏层中 7 个神经元的输入数据分别为：

$$z_1 = w(x_{1,1}) * x_1 + w(x_{2,1}) * x_2 + b_1$$

.....

$$z_7 = w(x_{1,7}) * x_1 + w(x_{2,7}) * x_2 + b_7$$

经过非线性逻辑函数处理，会得到 3 个输出结果，分别为 $f_1(z_1)$ ， $f_2(z_2)$ ， $f_3(z_3)$ ，它们加权平均的结果将作为第二个隐藏层中神经元的输入。第二个隐藏层中两个神经元的输入数据分别为：

$$z_4 = w(1,4) * f_1(z_1) + w(2,4) * f_2(z_2) + w(3,4) * f_3(z_3) + b_4$$

$$z_5 = w(1,5) * f_1(z_1) + w(2,5) * f_2(z_2) + w(3,5) * f_3(z_3) + b_5$$

同理，可以得到第二隐藏层中每个神经元的输出结果，分别为： $f_4(z_4)$ ， $f_5(z_5)$ ，它们的加权平均之和会作为输出层神经元的输入，即：

$$z_6 = w(4,6) * f_4(z_4) + w(5,6) * f_5(z_5) + b_6$$

经过输出层之后，将得到最终的预测结果 $f_6(z_6)$ 。由于采用的代价函数是非线性，通过其求解的方程不能实现期望结果。所以，必须利用数值优化进行求解。本文采用梯度下降法进行优化求解。梯度下降法从初始点采用一阶线性逼近，沿着负梯度方向移动，后回到原函数，反复迭代

至收敛^[18]。利用梯度下降法对 w 和 b 进行优化，为了满足梯度为 0 的一阶最优条件，需要使目标函数为凸函数，但是，目标函数实际上为非线性函数，不属于凸函数。因此，在计算中利用正则项为 L1 范数来缓解。当达到 1000 次迭代时，终止数值优化。

从图 7 可以看出，通过深度学习地震属性融合，融合后的地震属性与漏失量的相关系数到达 95%，预测结果如图 8 所示。

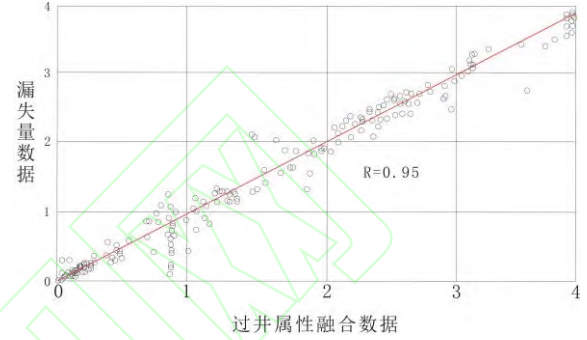


图7 相似系数

Fig.7 Similarity coefficient

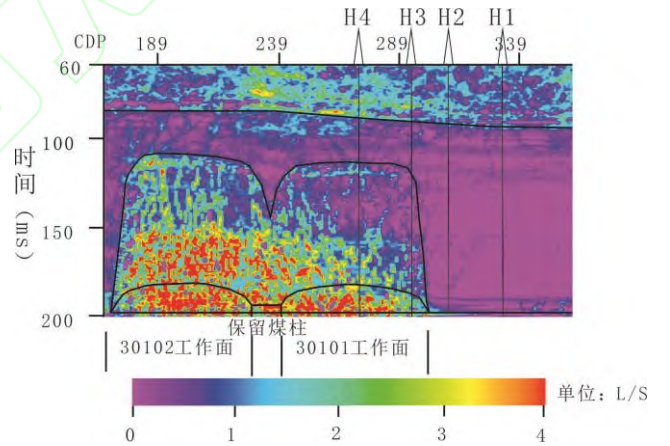


图8 多属性融合剖面（过孔垂直工作面剖面）

Fig.8 Multi-attribute fusion profile

通过单属性和多属性融合剖面比较（如图 5、图 8）可以看出，多属性融合是单一属性的综合，集合了各个属性的优点，如瞬时频率、相干体对大裂隙反映较好，瞬时振幅对裂隙带整体形态反映较好，蚂蚁追踪对细微裂隙反映较好，30Hz 谱分解数据对保留煤柱反映较好。多属性融合数据通过多种

属性的融合降低了地震解释的多解性。深度学习结果与多元回归、概率神经网络相比（图 9），深度学习预测结果与漏失量数据吻合度最高，预测结果也符合地质规律，而概率神经网络计算结果在冒落带附近发生连续跳跃（如图蓝色方框内），不符合力学特征。

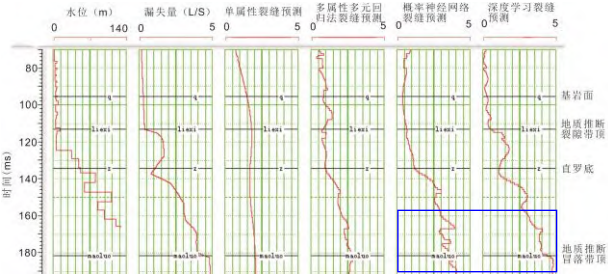


图 9 H3 孔多方法裂隙预测比较

Fig.9 Comparison of multi-method fracture prediction

多属性融合体值域与漏失量相同，在 0~4 之间，值越大代表裂隙越发育。从图中可以看出，从垂直方向看裂隙发育呈高角度状，裂隙带自上而下分为紫色部分（值在 0~1）、蓝色部分（值在 1~2）、绿色部分（值在 2~4）、黄、红色部分（值在 3~4），代表裂隙从弱到强，越靠近煤层，裂隙越发育。

通过多属性融合一方面大大提高了三维地震的成像精度，消除多解性；另一方面使得地震数据转换成冲洗液漏失量观测数据，漏失量观测数据大小和裂缝发育强度是成正相关的^[19-21]，根据这一原理可以实现导水裂隙带的半定量预测。多属性融合结合了不同地震属性的优点，其解释结果较为客观。通过与漏失量数据对比分析认为，融合数据中数值在 0~0.5 为裂隙不发育区，划分为变形带和正常区；数值在 0.5~3.5 划分为裂隙带；数值大于 3.5 划分为冒落带。

4 裂隙带发育特征及评价

4.1 裂隙发育特征

利用深度学习融合的数据进行裂隙带、冒落带解释，结合钻孔拟合时深转换公式：

$$\text{相对煤层开采底板高度} = 0.0069 \times \text{时间}^2 - 3.7848 \times \text{时间} + 464.1$$

将地震时间域数据转为深度域数据。经计算，30101 工作面裂隙带发育最大高度为 120m，30102 工作面裂隙带发育最大高度为 133m。对单个工作面来说，工作面中部裂隙带发育高度达到最大，向两侧采空边界处裂隙带发育高度逐渐减小，保护煤柱附近裂隙带发育高度约为 70m。从图 10 可以看出，随着埋深增加，裂隙发育程度不断加大，在冒落带附近裂隙发育程度达到最大。单个工作面裂隙带发育形态为“拱形”，裂隙特征表现为密集的网状分布，同一深度下 30102 工作面裂隙发育程度大于 30101 工作面。

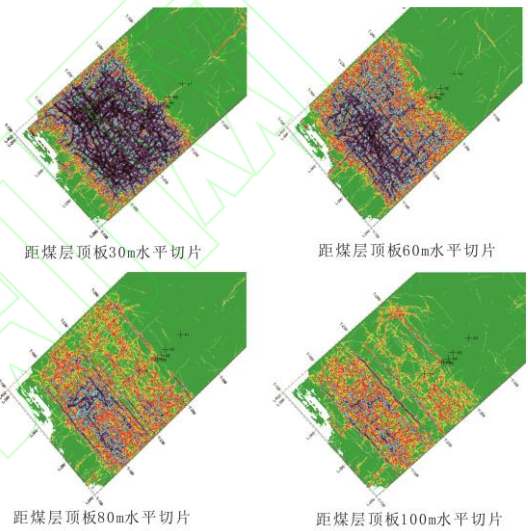


图 10 裂隙发育平面特征

Fig.10 Plane characteristics of fissure development

通过对融合后的三维地震数据进行裂隙自动提取，共解释出裂隙 200 多个，如图 11 (a) 所示。裂隙饼状图如图 11 (b) 所示，图中半径大小表示倾角，径线方向表示方位角。由于地震分辨率、信噪比和裂隙组合的原因，追踪出的裂隙数量不代表实际裂隙的数量，但可反映区内裂隙的整体发育程度。

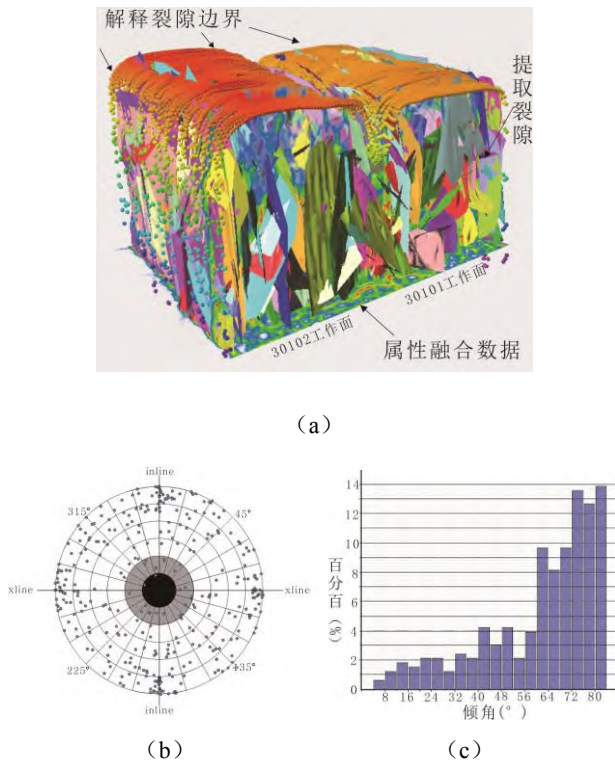


图 11 提取裂隙及裂隙统计特征

Fig.11 Predict cracks and their statistical characteristics

从图 11 (b) 中可以看出裂隙走向主要以平行和垂直巷道两个方向为主；裂隙倾角多为高角度，一般大于 70° 。图 11 (c) 为采动裂隙倾角分布图，倾角小于 30° 的裂隙占 8%，倾角为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的裂隙占 12%，倾角为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 的裂隙占 9%，倾角为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的裂隙占 17%，倾角为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 的裂隙占 18%，倾角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 的裂隙占 36%。煤层开采后在岩层中形成两类裂隙，一类为离层裂隙，另一类为竖向破裂裂隙^[22]。限于裂隙自动提取精度，本文将倾角小于 30° 的裂隙划分成离层裂隙。可以看出采动裂隙以高角度甚至垂直岩层层面的裂隙为主。

4.2 裂隙探测结果评价

(1) 裂隙带发育高度预测评价

将过井地震融合数据与钻探数据进行比较，如图 12 所示。

H1 号钻孔：在基岩段单位时间冲洗液消耗量变化为 $0.062 \sim 0.180 \text{ L/s}$ ，平均值 0.329 L/s 。在整个观测过程中，冲洗液消耗量没有随着钻孔孔

深增加而增加，冲洗液循环正常，没有出现中断或全部漏失的现象。过井地震融合数据数值在 $0 \sim 0.3$ 之间。根据 3.3 节判断依据认为没有采动裂隙发育，与钻探判断结果一致。

H3 号钻孔：孔深 135.16m 时冲洗液消耗量突然增大，从 135.16m 以浅的 0.062 L/s ，增大至 2.622 L/s ，增大了 42 倍，比对比钻孔同层位消耗量 (0.0771) 增大了 34 倍，钻孔水位呈缓慢下降趋势；结合岩芯编录判定导水裂隙带顶界位置孔深为 135.16m 处。过井地震融合数据在深度 138m 时数值增大，达到 0.5，根据 3.3 节判断依据认为导裂隙带顶界位置为 138m 处。

H4 号钻孔：孔深为 125.20m 时钻孔冲洗液突然漏失，循环中断，继续钻进 2.0m 时冲洗液又开始循环，并且漏失量呈忽大忽小的宽幅度震荡。结合岩芯编录判定导水裂隙带顶界位置孔深为 125.20m 处。过井地震融合数据在深度 129m 时数值增大，达到 0.5，根据 3.3 节判断依据认为导裂隙带顶界位置为 129m 处。

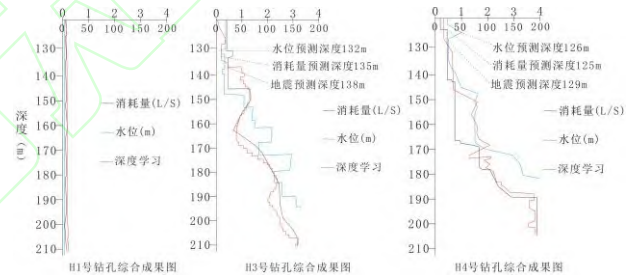


图 12 钻孔综合成果图（部分层段）

Fig.12 Comprehensive results of drilling

(2) 裂隙带倾角预测评价

本区进行了部分电视测井，将电视测井与过井地震融合数据进行对比，如图 13、14 所示。从图 13 可以看出，H3 孔电视测井中在 134.50m 开始出现垂向裂隙，延伸较短，随着孔深增大，裂隙密度增加，且裂隙延伸增大；144.10~146.10m 为一条长 2.0m 的斜向破坏裂隙，裂隙倾角约 87° 。截取相同深度地震融合数据可以看出，在 135~145m 间有裂隙，裂隙倾角约 80° 与电视测井结论接近。

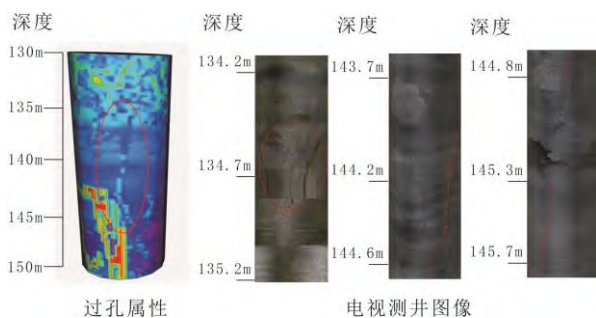


图 13 H3 号钻孔电视测井图像

Fig.13 H3 borehole TV logging image

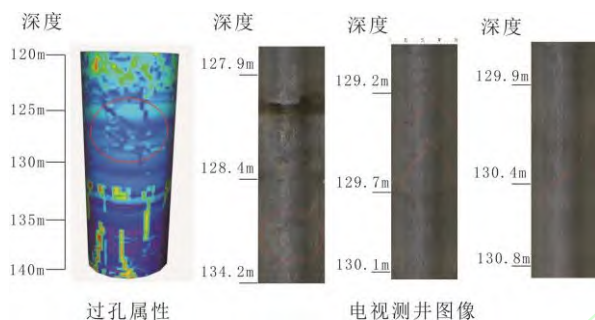


图 14 H4 号钻孔电视测井图像

Fig.14 H4 borehole TV logging image

从图 14 可以看出,H4 孔电视测井中在 128.60m 开始出现斜向裂隙,延伸较短,随着孔深增大,裂隙密度增加,以斜向裂隙为主,且裂隙延伸较短,裂隙倾角约 45° 。截取相同深度地震融合数据可以看出,在 125~130m 间有裂隙,裂隙倾角约 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 角度较小与电视测井结论接近。

从以上分析可以看出基于深度学习的地震属性融合技术导水裂隙带预测效果较好,精度较高。

5 裂隙演化规律

研究区煤层稳定,工作面布设及开采方式相同,因此可以将 30102 工作面采动情况看作是 30101 工作面 14 个月前的状态。本次研究采用类比法将采集的地震数据按照采动时间进行分类,研究裂隙生成、发育、闭合情况。

为了比较两个工作面裂隙发育情况,以深度

学习后融合的地震数据为基础,分别提取 30101、30102 工作面范围内裂隙,并统计其规律如图 15 所示。

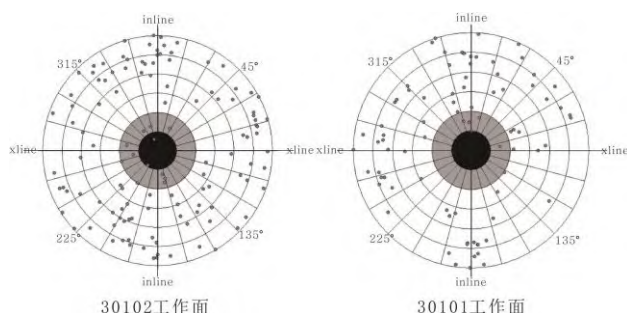


图 15 不同时间开采后裂隙饼状图

Fig.15 Pie chart of cracks after mining at different times

从图中可以看出,煤层开采 18 个月后(30101 工作面)裂隙比煤层开采 4 个月(30102 工作面)有所减少,经比较认为减少了约 21%,其中低角度离层裂隙(倾角 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$)减少了 50%。

随着采后时间推移,除裂隙数量有所减少之外,裂隙带发育最大高度也有所降低,经计算认为 30101 工作面裂隙带最大高度比 30102 工作面裂隙带最大高度减小了约 13m。通过两个工作面比较可以看出距煤层顶板较远岩体中裂隙发育强度较小,裂隙闭合较好;距煤层顶板较近岩体中发育裂隙发育强度大,裂隙未能完全闭合。工作面中部裂隙发育强度变化较大,裂隙闭合较好;工作面边缘裂隙发育强度变化较小,裂隙闭合较差。

6 结论

1、煤层采动过程中其上覆岩层变形与破坏受到多种因素影响,其中煤层采高、采厚、采速、覆岩类型及埋深等参数对导水裂隙带高度发育起到主导作用。岩层破坏在地震剖面中根据其振幅、频率的时空变化可以分辨出结构破坏及裂隙发育。探测应用表明,基于深度学习的地震属性融合技术对煤层采动引起的岩层破坏规律探测具有针对性,其精度能满足生产需要,费用低,是一种有效探测技术,具有推广应用价值。

2、研究表明 30101 工作面裂隙带发育最大高度为 120m, 30102 工作面裂隙带发育最大高度为 133m, 以高角度裂隙为主, 主要沿垂直、平行工作面方向发育。导水裂隙带的裂隙发育是先增大后降低, 裂隙带上部裂隙闭合较好, 裂隙带下部和工作面边缘裂隙闭合较差, 采动后 18 个月裂隙比采动后 4 个月减少了 21%, 离层裂隙减少了 50%。

3、本次研究受原始资料所限, 采用漏失量数据进行深度学习, 今后研究中可采用其他更好表征裂隙特征的数据如裂隙密度数据进行深度学习, 可以提高预测精度。

参考文献:

- [1] 王振荣. 厚松散含水煤层开采突水溃沙防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2016,44(8):46-51.
Wang Zhenrong. Water inrush and sand inrush prevention and control technology for coal mining in seam with thick and loose aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2016,44(8):46-51.
- [2] 刘洪磊, 杨天鸿, 张博华, 等. 西部煤层开采覆岩垮落及矿压显现影响因素研究[J]. 煤炭学报, 2017,42(2):460-469.
Liu Honglei, Yang Tianhong, Zhang Bohua, et al. Influence factors of overlying coal strata falling and mine pressure behavior in western coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(2):460-469.
- [3] 范立民, 马雄德, 李永红, 等. 西部高强度采煤区矿山地质灾害现状与防控技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2):276-285.
Fan Limin, Ma Xiongde, Li Yonghong, et al. Geological disasters and control technology in high intensity mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(2):276-285
- [4] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020,45(1):304 -316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):304-316.
- [5] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J]. 煤炭学报, 2020,45(1):317-329.
FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Background, thought and method of groundwater monitoring in large coal base of northwest China[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):317-329.
- [6] 范立民. 保水采煤面临的科学问题[J]. 煤炭学报, 2019,44(3):667-674.
FAN Limin. Some scientific issues in water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(3):667 -674.
- [7] 贺卫中, 向茂西, 刘海南, 等. 榆神府矿区地面塌陷特征及环境问题[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5):131-135.
HE Weizhong, XIANG Maoxi, LIU Hainan, et al. Ground subsidence and its environment problems in Yushenfu mining Area[J]. Coal Geology and Exploration, 2016,4(5):131-135.
- [8] 白乐, 李怀恩, 何宏谋, 等. 煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4):931-937.
Bai Le, Li Huaien, He Hongmou, et al. Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(2):931-937.
- [9] 杨艳国, 王军, 于永江. 河下多煤层安全开采顺序对导水裂隙带高度的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(s1):27-32.
Yang Yanguo, Wang Jun, Yu Yongjiang, et al. Effects of different coal safe mining sequence under river on height of water flowing fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(S1):27-32.
- [10] 高永格, 秦佳斌, 李奇贤. 导水裂隙带发育规律的模拟研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12):142-144.
Gao Yongge, Qin Jiabin, Li Qixian. Simulation study on development regularities of water-flowing fracture zones [J]. Coal Technology, 2016,35(12):142-144.
- [11] 申涛, 袁峰, 宋世杰, 等. P 波各向异性检测在采空区导水裂隙带探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):197-202.
Shen Tao, Yuan Feng, Song Shijie, et al. Application of P-wave anisotropy detection in detecting the conducting fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(1):197-202.

- [12] 凌云研究小组. 应用振幅的调谐作用探测地层厚度小于 1/4 波长地质目标[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3):268-274.
- LING Yun Study Group. Application of amplitude tuning in surveying geologic target thickness less than 1/4 wavelength [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38 (3): 268-274.
- [13] 王洪求, 杨午阳, 谢春辉, 等. 不同地震属性的方位各向异性分析及裂缝预测[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5):925-931.
- WANG Hongqiu, YANG Wuyang, XIE Chunhui et al. Azimuthal anisotropy analysis of different seismic attributes and fracture prediction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49 (5): 925-931
- [14] 汪勇, 陈学国, 王月蕾, 等. 叠后多属性分析在哈山西石炭系火山岩裂缝预测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2014(4):1772-1779.
- Wang Yong, Chen Xueguo, Wang Yuelei, et al. Application of multiple post-stack seismic attributes in the prediction of carboniferous fracture in west Hashan[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4):1772-1779.
- [15] 张仕良. 基于深度神经网络的语音识别模型研究[D]. 中国科学技术大学, 2017:56-58.
- Zhang ShiLiang. Research on deep neural networks based models for speech recognition[D]. University of science and technology of china, 2017:56-58.
- [16] 张天伦. 多隐层前馈神经网络的随机赋权训练算法研究[D]. 河北大学, 2016:14-15.
- Zhang TianLun. Research on stochastic weight training algorithm for feedforward neural network with multiple hidden layers[D]. HEBEI University, 2016:14-15.
- [17] 张蕾, 章毅. 大数据分析的无限深度神经网络方法[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1):68-79.
- Zhang Lei, Zhang Yi. Infinite depth neural network method for big data analysis[J]. Journal of computer Research and Development, 2016, 53(1):68-79.
- [18] 刘程浩, 李智, 徐灿, 等. 基于深度神经网络的空间目标常用材质 BRDF 模型[J]. 光学学报, 2017, 037(011):350-359.
- Liu Chenghao, Li Zhi, Xu Can, et al. BRDF model for Commonly used materials of space targets based on deep neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 037(011):350-359.
- [19] 张玉军, 李凤明. 高强度综放开采采动覆岩破坏高度及裂隙发育演化监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1):2994-3001.
- Zhang Yujun, Li Fengming. Monitoring analysis of fissure development evolution and height of overburden failure of high tension fullymechanized caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(S1):2994-3001.
- [20] 魏久传, 吴复柱, 谢道雷, 等. 半胶结中低强度围岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报, 2016(4):974-983.
- Wei Jiuchuan, Wu Fuzhu, Xie DaoLei, et al. Development characteristic of water flowing fractured zone under semi-cemented medium-low strength country rock[J]. Journal of China Coal Society, 2016(4):974-983.
- [21] 杨达明, 郭文兵, 赵高博, 等. 厚松散层软弱覆岩下综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11):3308-3316.
- Yang Daming, Guo Wenbing, Zhao Gaobo, et al. Height of water-conducting zone in longwall top-coal caving mining under thick alluvium and soft overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11):3308-3316.
- [22] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 023(005):466-469.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-Shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5):466-469.