

田伟,邹冠贵,汤小明,等. 基于 AVO 技术与伪泊松比属性预测灰岩富水性的方法[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2706-2717. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0131

TIAN Wei,ZOU Guangui,TANG Xiaoming, et al. Method of predicting the water abundance of limestone based on AVO technique and pseudo Poisson's ratio attribute[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(10):2706-2717. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0131

基于 AVO 技术与伪泊松比属性预测灰岩富水性的方法

田 伟¹,邹冠贵¹,汤小明¹,曾 萌²

(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. 桂林理工大学地球科学学院,广西 桂林 541004)

摘 要:为得到羊东矿区灰岩富水性情况,首先分析了矿区内钻井与测井资料,表明研究区内的灰岩与薄煤层界面存在反射波,通过测井资料建立了符合矿区实际的地球物理模型;然后结合流体替换方法以及 Shuey 近似公式对模型进行了 AVO 正演模拟。结果表明:在石灰岩含水饱和度低时,石灰岩顶界面伪泊松比属性值变化极小;当石灰岩含水饱和度高时,该界面伪泊松比属性值骤然增大。对羊东矿区而言,伪泊松比属性值在富水性较强的区域呈现高值,在富水性较弱的区域呈现低值;最后对矿区三维地震资料进行 AVO 反演,并使用伪泊松比属性对矿区内伏青灰岩和大青灰岩岩溶含水层进行富水性预测。

关键词:AVO 反演;伪泊松比属性;流体替换;富水性

中图分类号:P631;TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)10-2706-12

Method of predicting the water abundance of limestone based on AVO technique and pseudo Poisson's ratio attribute

TIAN Wei¹, ZOU Guangui¹, TANG Xiaoming¹, ZENG Hu²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to get water abundance of limestone in Yangdong Mine, firstly, the drilling data and logging data in Yangdong mine were analyzed, which indicates that there is reflection wave at the interface between limestone strata and thin coal strata in the study area. With the help of logging data, the authors established a geophysical model that is comply with Yangdong Mine. Subsequently, AVO forward modeling were carried out with fluid substitution methods and Shuey's approximation equation. Results show that the pseudo Poisson's ratio attribute value of limestone's roof changes a little, when water abundance of the limestone is low; the pseudo Poisson's ratio attribute value of limestone's roof increases sharply, when water abundance of the limestone is high. For Yangdong Mine, the value of pseudo Poisson's ratio attribute in the region that has high water abundance is high, and the value of pseudo Poisson's ratio attribute in the region that has low water abundance is low. Finally, AVO inversion for 3D seismic data in Yangdong mine were performed to make prediction of water abundance on Fuqing limestone karst aquifer and Daqing limestone karst aquifer in Yangdong Mine as using pseudo Poisson's ratio attribute.

Key words: AVO inversion; pseudo Poisson's ratio attribute; fluid substitution method; water abundance

在煤矿开采过程中,煤层底板突水事故频发,不仅严重影响煤矿的生产,也威胁着矿工的生命以及国

家的财产安全^[1]。如何有效和准确地预测含煤地层富水性强弱分布情况成为了关乎煤矿安全生产的重

收稿日期:2017-01-25 修回日期:2017-08-31 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家青年科学基金资助项目(41402143)

作者简介:田 伟(1993—),男,安徽阜阳人,硕士研究生。E-mail:15650783907@163.com。通讯作者:邹冠贵(1981—),男,福建龙岩人,副教授,博士。E-mail:cumtzzg@foxmail.com

大问题之一。

突水问题的防治,首先需要知道富水部位和涌水通道,目前所采用的技术手段可分为现场抽水试验法、多因素综合分析和物探测量法 3 种^[2]。现场抽水试验法以地下水径流理论为基础,在进行井中抽水时,通过观测水量和水位变化获得水文地质参数,从而预测含煤地层富水性。该方法是目前评价含煤地层富水性最直接、最可靠的方法,但由于试验成本较高,受经济条件的制约,因此在煤矿区内无法广泛使用^[3-4];多因素综合分析法是运用多元信息复合叠加原理,根据多个水文地质物理场的不同特征,相互对比验证,从而对含煤地层的富水性进行系统综合分析^[5]。该方法可以充分利用已有的地质、水文等资料,难点在于如何处理各因素之间的关系和指标选取,结果易受到数据点分布的影响。

物探测量法可使用瞬变电磁法、直流电法以及地震勘探等地球物理方法对含煤地层进行富水性预测。虽然瞬变电磁法和直流电法对富水区探测效果好,但对于煤田中灰岩地层埋藏情况,探测难度较大;而地震勘探由于具有准确性好、分辨率高、勘探深度大等优点受到广泛关注,比如使用地震勘探与其他地球物理方法相结合来预测含煤地层富水性强弱分布情况^[6-7];通过分析波阻抗与含煤地层孔隙度关系式,结合波阻抗反演得到含煤地层孔隙度数据体,可预测含煤地层富水性强弱分布情况^[8];也可使用 Wyllie 平均方程对含煤岩溶陷落带进行富水性预测^[9]。这些方法主要是利用叠后地震资料进行解释分析。由于叠前地震资料比叠后地震资料有着更为丰富的信

$$\begin{bmatrix} \sin i_1 & \cos j_1 & -\sin i_2 & \cos j_2 \\ \cos i_1 & -\sin j_1 & \cos i_2 & \sin j_2 \\ \sin 2i_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos 2j_1 & \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \frac{V_{S2}^2 \rho_2}{V_{S1}^2 \rho_1} \sin 2i_2 & -\frac{V_{P1} \rho_2}{V_{S1} \rho_1} \cos 2j_2 \\ -\cos 2j_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}} \sin 2j_1 & \frac{V_{P2} \rho_2}{V_{P1} \rho_1} \cos 2j_2 & -\frac{V_{S2} \rho_2}{V_{P1} \rho_1} \sin 2j_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin i_1 \\ \cos i_1 \\ \sin 2i_1 \\ \cos 2j_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ρ_1 为介质 1 的密度, g/cm^3 ; V_{P1} , V_{S1} 分别为介质 1 的纵波和横波速度, km/s ; ρ_2 , V_{P2} , V_{S2} 分别为介质 2 的密度、纵波速度以及横波速度。

由于 Zoeppritz 方程较为复杂,因此需要对 Zoeppritz 方程简化。KOEFOED(1955) 利用 17 组不同弹性参数的模型,研究了泊松比对两个各向同性介质之间反射界面产生的反射系数的影响,得到了将泊松比与反射系数直接联系起来的 Zoeppritz 方程^[13]; BORTFELD(1961) 在假设界面两侧弹性参数差异较小的前提下,给出简化的 AVO 反射系数与透射系数

息,而 AVO 属性作为叠前地震资料分析方法中不可或缺的一部分,因此笔者尝试以河北羊东矿区为例,利用 AVO 技术预测含煤地层富水性强弱分布情况。

1 理论基础

1.1 Zoeppritz 方程及其简化

AVO 技术是利用共中心点道集或共反射面元分析反射波振幅随偏移距(或入射角)的变化规律,估算界面两侧的弹性参数,进一步推断地层岩性和含油气的一种资料处理与分析技术。该技术的理论基础是 Zoeppritz 方程^[10-11],当一个平面纵波按照一定角度入射到两种介质的分界面时(图 1),就会发生反射和透射,并产生反射纵波、反射横波、透射纵波以及透射横波,根据波在弹性分界面上所满足的边界条件得到了 4 个方程,即 Zoeppritz 方程^[12](式(1))。

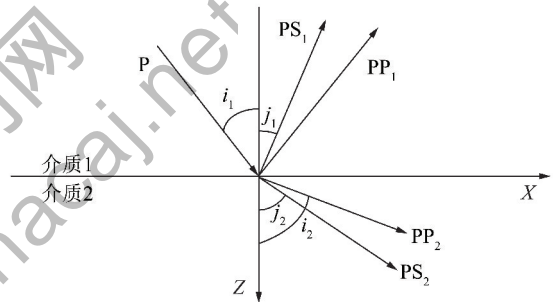


图 1 纵波反射和透射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal wave reflection and transmission
P—入射纵波;PS₁—反射横波;PP₁—反射纵波;
PS₂—透射横波;PP₂—透射纵波

近似解析解^[14]。AKI 和 RICHARD(1980) 给出了以相对纵波速度差异、相对横波速度差异、相对密度差异和纵横波速度比为参量的 AVO 近似公式^[15]。SHUEY(1985) 对 Aki-Richard 公式进行适当修改得到 Shuey 近似公式^[16](式(2))。该近似公式应用的前提条件是平面波入射到平面的各向同性的半无限介质中,而且相邻地层介质弹性参数变化不大。因该近似公式能够有效的简化介质弹性参数的反演计算,可将非线性问题转化为线性问题加以解决,而且公式中的每一项都具有物理意义,因此该公式被广

泛应用。需要说明的是当地震纵波以小角度或中等角度入射时,该近似公式中第3项可忽略^[17-19]。

$$R(i) = R_p + \left\{ R_p \left[H - 2(1 + H) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \right] + \frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma)^2} \right\} \sin^2 i + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} (\tan^2 i - \sin^2 i) \quad (2)$$

式中, $i = (i_1 + i_2)/2$; $R_p = (\Delta V_p/V_p + \Delta\rho/\rho)/2$; $H = (\Delta V_p/V_p)/(\Delta V_p/V_p + \Delta\rho/\rho)$; $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$; $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$; $V_p = (V_{p1} + V_{p2})/2$; $\Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}$; $V_s = (V_{s1} + V_{s2})/2$; $\Delta V_s = V_{s2} - V_{s1}$; $\Delta\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$; $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ 。

由于煤层的厚度一般为2~10 m,通常是薄互层,反射并不是由单一界面产生,而是顶、底反射与层间多次波叠加的复合波,因此在对薄互层进行AVO正演模拟时,需考虑层厚的影响。不少学者开展了薄互层AVO正演模拟方面的研究,彭苏萍等(2005)在使用AVO技术进行煤层瓦斯富集以及含煤地层的AVO正演模拟研究时,使用AVO正演软件进行模拟计算^[20];陈同俊(2009)则是利用SCHOENBERG(1992)给出的各向异性介质中P波反射系数的矩阵解法,对VTI型薄互层构造煤的P波AVO曲线进行计算^[21];邓小娟等(2010)利用所推导出的3层(EDA薄层位于中间)介质的平面波反射和透射系数,对薄互层进行纵波以及P-SV转换波AVO正演模拟^[22-23];张铁强等(2013)使用反射率方法对不同顶、底板岩性薄互层进行AVO正演模拟,并对薄互层的AVO响应特征进行分析^[24]。

这些模拟方法是在得到薄互层纵波反射系数的基础上,通过与地震子波进行褶积获得合成地震记录,从而得到薄互层的AVO曲线。目前AVO正演模拟软件对薄互层AVO正演模拟这一方法应用较为广泛。参考彭苏萍等^[20]所建模型,结合羊东矿区实际情况,设计了一组模型,模型的顶底板均为石灰岩,厚度为100 m,弹性参数为 $V_p = 4\ 300$ m/s; $V_s = 2\ 350$ m/s; $\rho = 2.52$ g/cm³;中间层煤层的弹性参数为 $V_p = 2\ 000$ m/s; $V_s = 900$ m/s; $\rho = 1.35$ g/cm³。由于煤层厚度一般为2~10 m,因此给定煤层厚度的变化范围在1~10 m。在计算时选择58 Hz零相位Ricker子波,使用AVO正演模拟软件得到煤层顶界面AVO曲线,与本文拟采用的Shuey近似公式计算得到的煤层顶界面AVO曲线进行对比,从而得到在相同入射角范围(0~30°)内,Shuey近似公式计算的AVO曲线产生的最大相对误差与煤层厚度之间关系折线图(图2),其中最大相对误差是指在0~30°范围内最大的相对误差,而相对误差的定义为

$$\delta = \frac{|R(i)_{\text{ruan}} - R(i)_{\text{Shuey}}|}{R(i)_{\text{ruan}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, δ 表示相对误差; $R(i)_{\text{ruan}}$ 表示使用AVO正演模拟软件计算所得入射角为*i*时煤层顶界面反射系数; $R(i)_{\text{Shuey}}$ 表示使用Shuey近似公式计算得到入射角为*i*时煤层顶界面反射系数。

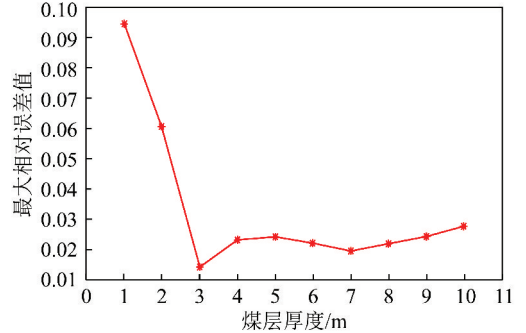


图2 最大相对误差值与煤层厚度关系

Fig. 2 Relationship between maximum relative error and coal seam thickness

由图2可以看出,当煤层厚度较薄(1~2 m)时,使用Shuey近似公式计算产生的最大相对误差较大,甚至接近10%;而当煤层厚度变厚时,所产生的最大相对误差骤然减小,降低到了2%~3%。钻探资料表明:羊东矿区内大青灰岩、伏青灰岩的厚度较大,平均厚度超过2 m。矿区内主采煤层的层厚度相对稳定,厚度超过2 m,因此在误差允许的范围内在羊东矿区内可使用Shuey近似公式进行AVO正演模拟计算。

1.2 伪泊松比

1.2.1 伪泊松比定义

为说明伪泊松比属性设计了一组由双层介质组成的模型,介质的物性参数参见表1。当入射角在0~30°时,由于近似公式中的第3项数值较小可直接忽略,使得式(2)变为Shuey二项式(式(4))。在共中心点道集上沿正常时差校正过的同相轴拾取的振幅与 $\sin^2 i$ 关系可拟合为一条直线^[25],可将式(4)变为式(5)的形式。使用设计的模型,结合Shuey二项式,得到模型的反射系数与 $\sin^2 i$ 的线性关系图(图3(a),图中给出的关系式,是对模型使用Shuey二项式进行计算所得结果)。图3(a)中直线的斜率*G*表示AVO梯度属性,直线与纵轴交点(0,*P*)中截距*P*表示AVO截距属性,其中 $P = R_p$ 表示纵波垂直入射时的反射系数。

$$R(i) = R_p + \left\{ R_p \left[H - 2(1 + H) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \right] + \frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma)^2} \right\} \sin^2 i \quad (4)$$

$$R(i) = P + G \sin^2 i \quad (5)$$

式中, $G=R_p[H-2(1+H)(1-2\sigma)/(1-\sigma)]+\Delta\sigma/(1-\sigma)^2$; $P=R_p$ 。

表 1 模型物性参数

Table 1 Physical parameters of model

模型介质	纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
介质 1	2 200	1 050	1.45
介质 2	3 200	1 700	2.45

注:模型不涉及实际意义,因此未给出介质 1 和 2 的具体岩性。

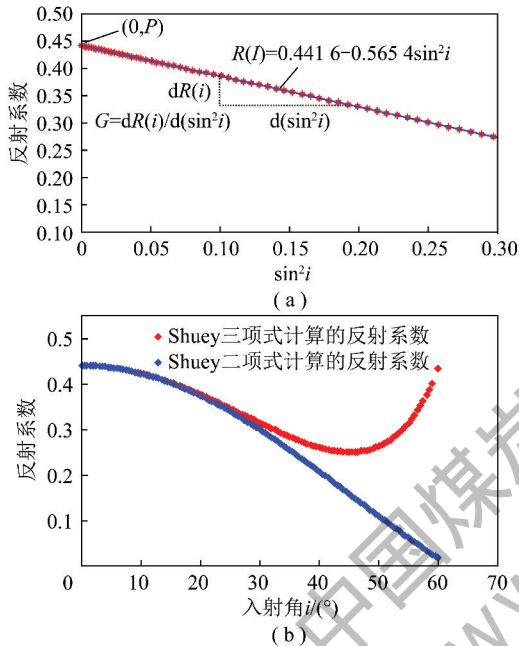


图 3 模型的反射系数与 $\sin^2 i$ 和入射角的关系

Fig. 3 Relationship of model between reflection coefficient of longitudinal wave and $\sin^2 i$, incident angle

使用表 1 所给模型,结合式(2)以及式(4),可得模型的反射系数与入射角 i 之间的关系散点图(图 3(b))。由图 3(b)可以看出当入射角 $i > 30^\circ$ 时,随着入射角 i 的增大使用 Shuey 二项式(式(4))计算所得反射系数与 Shuey 三项式(式(2))计算的实际反射系数相差逐渐增大。图 4 为使用 Shuey 二项式计算反射系数的误差率与入射角关系散点图(图中纵坐标为误差率,表示 Shuey 三项式与 Shuey 二项式计算所得反射系数之差在 Shuey 三项式计算的反射系数中所占比率,无量纲)。由图 4 可以看出,当入射角 $i > 30^\circ$ 时,随着入射角的增大,使用 Shuey 二项式计算所得误差也骤然增大;当入射角 $i = 60^\circ$ 时,误差率甚至接近于 100%。这是由于当入射角 $i > 30^\circ$ 时,Shuey 三项式中第 3 项数值开始逐渐增大,对计算结果的影响亦相应增大,成为不可忽略的一项。因此当入射角

$i > 30^\circ$,特别是在入射角 i 较大情况下,不再适合使用 Shuey 二项式计算反射系数。

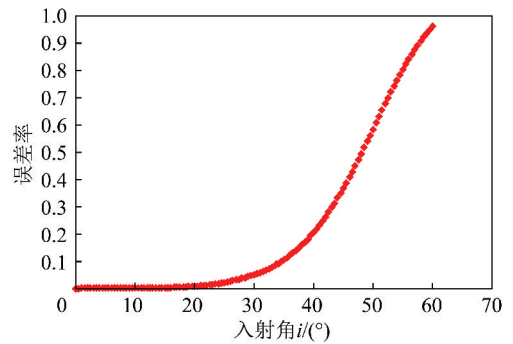


图 4 Shuey 二项式计算的误差率与入射角关系

Fig. 4 Relationship between error rate generated by using Shuey two-item calculations and incident angle

伪泊松比属性是 AVO 属性的一种,是由 AVO 截距属性与梯度属性相加得到。在某些情况下,该属性值与上下层岩石泊松比之差 $\Delta\sigma$ 成正比关系,因此将该属性称之为伪泊松比属性。根据上述定义,结合式(5),伪泊松比属性可表示为式(6)的形式。当 $V_p/V_s = 2, \sigma = 1/3$ (与式(2)中表达式相同),代入式(6)中可得 $P+G=9/4\Delta\sigma$ 。该属性可反映上下层岩石泊松比的变化特征,同时还能反映地层的岩性以及流体饱和度等信息。

$$P + G = R_p + \left\{ R_p \left[H - 2(1 + H) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \right] + \frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma)^2} \right\} \quad (6)$$

1.2.2 模型建立

在分析矿区已有测井与钻井资料的基础上,建立相应的地球物理模型。具体步骤是:

(1)收集整理石灰岩岩溶含水层信息。首先从地层综合柱状图收集大青灰岩与伏青灰岩岩溶含水层的深度、厚度信息以及顶(底)板岩性等信息,并进行分析整理,得到灰岩及其顶、底板岩性统计表(表 2)。

表 2 钻井中灰岩及其顶、底板岩性统计

Table 2 Statistical table of lithology of the limestone and its roof, floor strata for all drilling wells

实际地层模型	出现次数	所占比例/%
砂岩-石灰岩-煤层	11	78.5
泥岩-石灰岩-煤层	2	14.3
鲕状铝土矿-石灰岩	1	7.1

(2)地球物理模型的建立。根据表 2 的统计信息,发现顶板为砂岩,中间为石灰岩,底板为煤这一地层模型出现次数较多,因此以该地层模型为基础,建立符合矿区的地球物理模型(表 3)。

表 3 羊东矿区地球物理模型物性参数表

Table 3 Physical parameters of geophysical model in Yangdong mining area

岩性	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	矿物基质体积 模量/GPa	矿物基质密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
顶板砂岩	3 800	2 400	2.40	10	36.141 5	2.642 8
中间层石灰岩	4 300	2 350	2.52	12	66.666 1	2.719 9
底板煤层	2 000	900	1.35	7	4.600 2	1.428 2

(3)测井曲线的预处理。由于钻探时间较早,灰岩岩石样品缺失,只能通过测井曲线确定模型所需的各项物性参数。以 120 井为例,缺乏纵、横波速度曲线以及灰岩层含水饱和度信息,同时由于测井仪器以及系列不同,直接使用已有的密度曲线将会产生较大误差。为解决上述问题,首先对原始密度曲线进行归一化处理^[26];然后对归一化后的曲线做线性运算,获得可直接使用的密度曲线;最后结合 Reversed Gardner 公式以及 Castagna 公式依次合成所需的纵波和横波速度曲线。至于所需的石灰岩层含水饱和度信息,需要使用电阻率测井曲线,结合阿尔奇公式^[27]计算出石灰岩岩溶含水层含水饱和度数据。对区内其他井的测井曲线按照相同的步骤进行处理得到所有井的纵横波速度等曲线,以及大青灰岩与伏青灰岩岩溶

含水层含水饱和度信息。

(4)确定地球物理模型参数。以预处理后的 120 井(图 5)为例,在煤层段内,等间隔取 5 组纵波、横波速度以及密度数据,并计算出这些数据的平均值;然后对区内其他测井曲线按照相同步骤进行处理从而得到不同井的平均值;最后将这些平均值再取平均,并将该平均值作为煤层的物性参数。在进行流体替换时,还需知煤中固体基质的体积模量等信息,这些信息通常是已知岩石中矿物组分的体积百分比与各矿物弹性模量前提下,使用 VRH 公式计算即可^[28],但地震解释人员很难获得矿物成分数据。为解决这一问题,本文采用统计平均方法^[29]求取煤中固体基质的体积模量以及密度。

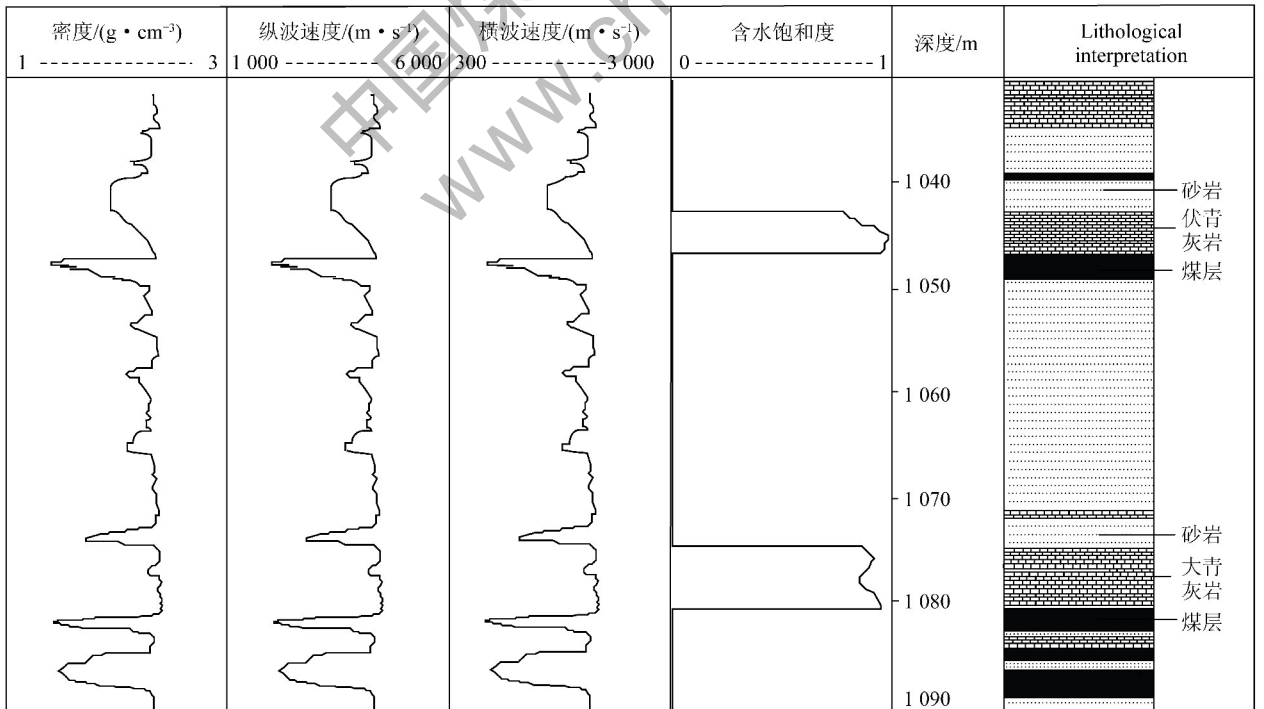


图 5 预处理后 120 号测井曲线及其岩性解释

Fig. 5 Logging curves and lithological interpretation of 120 well after pretreatment

1.2.3 泊松比与含水饱和度关系

为分析灰岩富水性与 AVO 属性的关系,需要对

模型中灰岩进行流体替换,作为流体替换核心方法——Gassmann 方程首当其冲。

Gassmann 方程建立了流体饱和岩石有效体积模量与骨架体积模量、干燥岩石的体积模量、孔隙流体的体积模量,以及孔隙度之间关系。使用该方程进行流体替换时,主要有两种情况:

(1)同一孔隙度下由干岩石替换成饱和双相介质流体岩石;

(2)同一孔隙度下由饱和岩石中的流体 1 替换成流体 2。

根据 Gassmann 方程在推导时所作的假设,Gassmann 方程的适用条件是:

(1)在宏观上,岩石是均质的和各向同性的,在微观上可以是各向异性的;

(2)地震波的频率足够低,使得地震波的波长远大于岩石孔隙的尺度,达到应力平衡;

(3)地震波的强度足够小;

(4)岩石内孔隙是彼此连通的;

(5)岩石的流体和骨架之间没有化学作用,岩石是由单一矿物构成的;

(6)岩石处于流体饱和状态^[30]。

对于灰岩是否满足 Gassmann 方程的条件,需要进行具体分析:

条件(1):由矿区井下施工钻孔与放水试验成果可知,大青灰岩和伏青灰岩岩溶含水层的岩溶发育程度整体较低,本研究区 3.6 km² 内并不具备发育形成大规模岩溶的条件。矿区内大青灰岩岩溶含水层的灰岩多为灰色或深灰色厚层状,且分布稳定。该含水层发育有裂隙,裂隙主要沿北东向 10~30°,次为北西向 290~300°,裂隙区域主要位于矿区东部靠近勘探边界附近。而伏青灰岩岩溶含水层多以灰色较为致密的灰岩为主,裂隙不发育。由于大青灰岩裂隙发育区面积较小且处在矿区边界附近,因此对整体影响较小。统计矿区内测井曲线物性参数时,发现大青灰岩与伏青灰岩岩溶含水层段灰岩物性参数变化不大,因此灰岩层在宏观上可近似看成均质的和各向同性的。在微观上由于岩石内孔隙的存在,使得灰岩在微观上各向异性。总体上讲,灰岩满足该条件;

条件(2):地震勘探中使用的地震波主频小于 100 Hz,而灰岩的速度一般在 4 000~5 000 m/s,计算可得石灰岩中地震波波长大约为几十米,因此灰岩满足该条件;

条件(3):由于煤田地震勘探与常规油气勘探使用相同的地震波,因此条件(3)满足;

条件(4):石灰岩是以方解石作为主要矿物成分的沉积岩,在微观上,当地下水侵入石灰岩孔隙时,由于方解石极易溶于水,所以岩石内孔隙的连通性不断

增强,孔隙空间也不断增大。即经地下水长时间作用后,石灰岩内部孔隙相互连通。对于埋藏较深的大青灰岩与伏青灰岩岩溶含水层而言,虽然这些岩溶含水层岩溶发育程度整体较低,不具备发育成大规模岩溶的条件,但是研究区的抽水试验表明,灰岩水的连通性好,这主要是由于这些含水层埋藏于地下深部,长时间受地下水作用,从而使得石灰岩中孔隙相互连通,因此条件(4)满足;

条件(5):虽然不同石灰岩矿物成分中方解石含量不尽相同,但一般均大于 90%,有的甚至高达 95% 而其他矿物成分的含量极低,因此可将石灰岩近似看成由单一矿物组成的岩石;

条件(6):由于岩石长期埋藏于地下深处,达到了流体饱和状态,当外界因素的变化导致这一流体饱和状态发生改变时,会有新的流体流入该岩石,并使得该岩石重新达到流体饱和状态,因此满足条件(6)^[31-32]。

在使用 Gassmann 方程对岩石进行流体替换时,具体步骤是:

(1)在已知岩石孔隙度 φ 、纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、孔隙流体的组成成分以及该成分的物性参数 ρ_f 、 K_f 、 S_f 、矿物基质的弹性模量 K_0 以及密度 ρ_0 的情况下,根据公式计算出岩石总密度 ρ_B 、体积模量 K_{sat} 和剪切模量 μ_{sat} ;

(2)根据 Gassmann 方程中孔隙流体的计算公式计算孔隙流体的体积模量 K_n 、密度 ρ_n ;

(3)根据已知矿物基质的弹性模量 K_0 与密度 ρ_0 ,结合(2)中所得孔隙流体的体积模量 K_n 、密度 ρ_n 计算出岩石骨架体积模量 K^* ;

(4)将岩石中孔隙流体替换为新流体,并给出新体积模量 K_n 以及密度 ρ_n ;

(5)在流体替换时,由于岩石骨架等性质并未发生变化,即岩石骨架的体积模量 K^* 、矿物基质的体积模量 K_0 、含流体岩石的剪切模量 μ_{sat} 均未发生改变,因此只需计算流体替换后新岩石的体积模量以及密度,而后根据纵、横波速度计算公式,计算流体替换后岩石的纵波速度、横波速度等数值;

按照 Gassmann 方程流体替换步骤,对模型中石灰岩进行流体替换,在流体替换时假设石灰岩孔隙中只有水与气两种流体,其中水的体积模量为 2.2 GPa,密度为 1.09 g/cm³,空气的体积模量为 0.000 142 GPa,密度为 0.001 293 g/cm³。得到石灰岩在含水饱和度改变情况下,岩石的纵波速度、横波速度以及泊松比的变化情况,并绘制出图 6 的折线图。

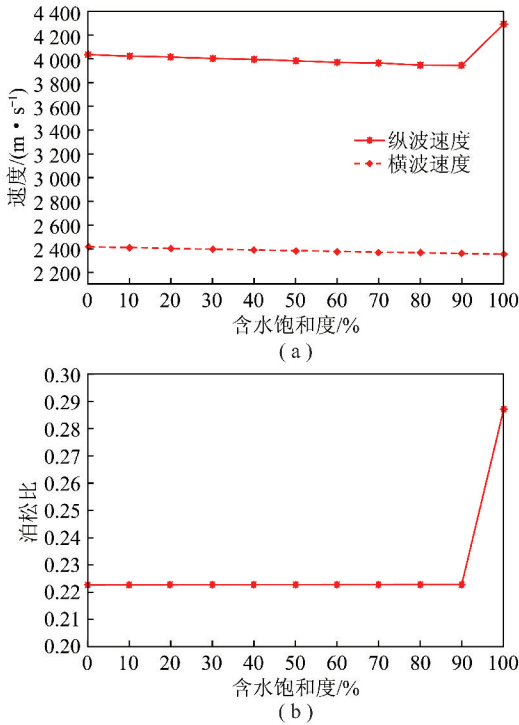


图6 石灰岩速度、泊松比与含水饱和度的关系

Fig. 6 Relationship between velocity, Poisson's ratio and water saturation of limestone

由图6(a)可知,当石灰岩含水饱和度在0~90%时,纵波速度会随着含水饱和度的增大而逐渐减小;当含水饱和度在90%~100%时,纵波速度骤然增大。而石灰岩横波速度却随着含水饱和度的增大而逐渐减小。纵波速度产生这一变化的原因是流体替换时空气的体积模量与密度远小于水,根据流体替换具体步骤,使用 Gassmann 方程(式(7))计算可知新岩石的体积模量以及密度均会随着含水饱和度的增大而逐渐增加,但密度增长速度要大于体积模量的增长速度,所以当含水饱和度在0~90%时,岩石的纵波速度随着含水饱和度的增大而逐渐减小。当岩石含水饱和度在90%~100%时,由于含水饱和度接近于1,此时新岩石体积模量的增长速度逐渐大于密度,因此当含水饱和度在90%~100%时,岩石的纵波速度骤然增大。岩石横波速度产生这一变化是由于岩石的剪切模量 μ_{sat} 不随孔隙流体发生改变,并且流体替换中空气的密度远小于水,使得岩石密度随着含水饱和度的增大而逐渐增大,根据横波速度计算公式可知石灰岩横波速度会随着含水饱和度的增大而逐渐减小,当含水饱和度 $S_w=100\%$ 时,达到最小值。

$$\begin{cases} K_s = K_d + \Delta K_d \\ \Delta K_d = \frac{K_0(1 - K_d/K_0)^2}{1 - \varphi - K_d/K_0 + \varphi K_0/K_r} \\ \mu_s = \mu_d \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_0 表示岩石中矿物基质的体积模量; K_r 表示岩石中孔隙流体的体积模量; K_d 表示岩石骨架的体积模量; K_s 表示流体饱和岩石的体积模量; φ 表示岩石的孔隙度; μ_d 表示岩石骨架的剪切模量; μ_s 表示流体饱和岩石的剪切模量; ΔK_d 表示流体替换后岩石体积模量的增量。

由图6(b)可知,当石灰岩含水饱和度在0~90%时,泊松比变化极小,而当含水饱和度在90%~100%时,泊松比骤然增大。这一变化规律产生的原因是当石灰岩含水饱和度在0~90%时,岩石纵波速度会随着含水饱和度的增大而逐渐减小,但减少缓慢;当含水饱和度在90%~100%时,纵波速度骤然增大。石灰岩的横波速度随着含水饱和度的增大而一直减小,由泊松比与岩石纵、横波速度三者之间的关系式可得:当石灰岩含水饱和度在0~90%时,泊松比变化极小;当含水饱和度在90%~100%时,泊松比骤然增大。

由表4可知,当石灰岩含水饱和度从0跃升至100%时,石灰岩各物性参数中泊松比变化率最大,高达28.91%;纵波速度次之,为6.425%;密度变化率较低,只有5.276%;横波速度最低,且为负值。因此泊松比参数对高含水饱和度石灰岩具有较强的指示作用。

表4 岩石物性参数变化率

Table 4 Rate of change in rock geophysical parameters

含水饱和度和/%	纵波速度/ (m·s ⁻¹)	横波速度/ (m·s ⁻¹)	泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)
0	4 040.4	2 413.3	0.222 7	2.393 7
100	4 300.0	2 350.0	0.287 1	2.520 0
变化率/%	6.425	-2.623	28.91	5.276 0

1.2.4 伪泊松比与岩层含水饱和度关系

根据表3所建模型,结合 Shuey 近似公式,计算出石灰岩顶界面的 AVO 截距、梯度以及伪泊松比属性,得到伪泊松比属性与石灰岩含水饱和度之间的关系。具体做法如下:

(1)确定正演过程中的变量。由于计算过程中涉及多个变量,为准确获得伪泊松比属性与石灰岩含水饱和度之间的关系,挑选石灰岩含水饱和度作为唯一变量,其他均为常量;

(2)流体替换。使用 Gassmann 方程对灰岩进行流体替换,计算出不同含水饱和度时,岩石的纵波速度、横波速度等参数值(在1.2.3节中已完成);

(3)成图。由步骤(2)中所得结果,结合 Shuey 近似公式进行正演计算,得到不同含水饱和度情况

下,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值,并绘制出石灰岩顶界面伪泊松比属性与含水饱和度关系折线图(图 7)。

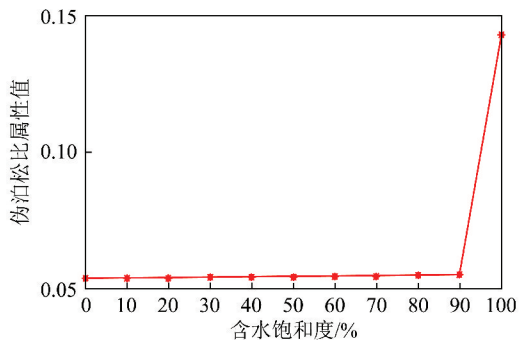


图 7 石灰岩顶界面伪泊松比与含水饱和度的关系

Fig. 7 Relationship between pseudo Poisson's ratio and water saturation for the roof of limestone

由图 7 可知,当石灰岩含水饱和度在 0~90% 范围内时,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值虽然缓慢增大但是变化极小;当石灰岩含水饱和度在 90%~100% 时,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值骤然增大。即在含水饱和度 $S_w = 0$ 时,伪泊松比属性值最小,而当含水饱和度 $S_w = 100\%$ 时,伪泊松比属性值达到最大。

由图 5 中预处理后的 120 井的含水饱和度曲线以及其他井的含水饱和度曲线可知,伏青灰岩与大青灰岩岩溶含水层段的含水饱和度在 80%~100% 内,即该矿区大青灰岩岩溶含水层与伏青灰岩岩溶含水层的含水饱和度较高。结合正演模拟结果表明:对羊东矿区而言,当石灰岩富水性较强时,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值会呈现相对高值;当石灰岩富水性较弱或不含水时,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值会呈现相对低值。

由伪泊松比定义知,当 $V_p/V_s = 2, \sigma = 1/3$ 时,伪泊松比属性剖面可以反映出上下层介质的泊松比差值。即在 $V_p/V_s = 2, \sigma = 1/3$ (与式(2)中参数的表达式相同)的情况下,当石灰岩含水饱和度发生改变时,导致石灰岩泊松比参数发生变化,而砂岩泊松比不发生改变,因此伪泊松比剖面的变化只取决于模型中石灰岩泊松比参数的变化情况。由于泊松比参数对于高含水饱和度石灰岩具有较强的指示作用,因此当 $V_p/V_s = 2, \sigma = 1/3$ 时,使用伪泊松比属性可以有效的指示高含水饱和度石灰岩。

2 地质概况

羊东矿位于鼓山东麓,该区属于丘陵与山前倾斜平原过渡类型,地势西高东低。最高处位于井田西

部,标高为 180 m,最低处位于井田东南部,标高为 106 m,相对高差为 74 m 左右。在羊东矿区内可开采煤层有 6 个,分别为 2 号,4 号,6 号,7 号,8 号,9 号,主采煤层有 2 个,分别是 2 号和 4 号。其中 2 号一般厚度为 6.0 m,夹矸厚度变化较大,最薄约为 0.01 m,最厚可达 33 m;而 4 号煤层结构较为简单,这两个煤层均为全区稳定型可采煤层。由地质资料可知,区内正断层较为发育,断层落差较大,断层组合复杂,都给煤矿的安全开采增加了难度。

根据井田水文地质勘探以及矿井多年采掘揭露资料发现,矿区内主要有 10 个灰岩含水层。这些灰岩含水层中,由于大青灰岩与伏青灰岩岩溶含水层富水性较强,而且水量分布不均,严重威胁着煤矿安全开采,其他灰岩岩溶含水层对煤矿开采影响不大,因此重点研究大青灰岩岩溶含水层与伏青灰岩岩溶含水层的富水性情况。由矿区内钻孔资料综合分析发现,伏青灰岩大致位于 2 号煤底板下 77 m 处,呈浅灰、青灰色;大青灰岩位于 2 号煤底板下 108 m 处,呈灰色或深灰色,这两个灰岩岩溶含水层在矿区内分布广泛,产状和厚度较稳定,是良好的标志层。

3 伪泊松比属性预测富水性

3.1 AVO 反演

由伪泊松比属性的定义可知,伪泊松比属性是 AVO 反演所得的截距属性与梯度属性的累加和,因此为获得伪泊松比属性数据体,需对矿区实际地震资料进行 AVO 反演。具体流程是:

- (1) 收集矿区内测井曲线资料并进行预处理;
- (2) 挑选出实际地震记录中反射波强、反射波组连续性良好的层位,与测井合成的地震记录相结合进行层位标定;
- (3) 使用测井曲线对挑选出的层位进行 AVO 正演,并对所得 AVO 曲线进行截距与梯度分析;
- (4) 对叠前地震数据体进行剩余静校正、大道集以及保幅处理;
- (5) 从实际地震记录得到所挑选出的层位的顶、底板 AVO 曲线,并对该曲线进行截距和梯度分析;
- (6) 将测井与实际地震记录所得 AVO 曲线进行对比分析,以检验实际地震数据的处理是否得当。若 2 者相差不大时,说明对实际地震记录进行的剩余静校正等处理恰当,结果可靠;若相差较大时,则需要对实际地震数据进行重新处理,直到 2 者相差较小即可;
- (7) 反演出 AVO 截距属性与梯度属性数据,结合伪泊松比属性定义,得出伪泊松比属性数据体,流

程如图 8 所示。

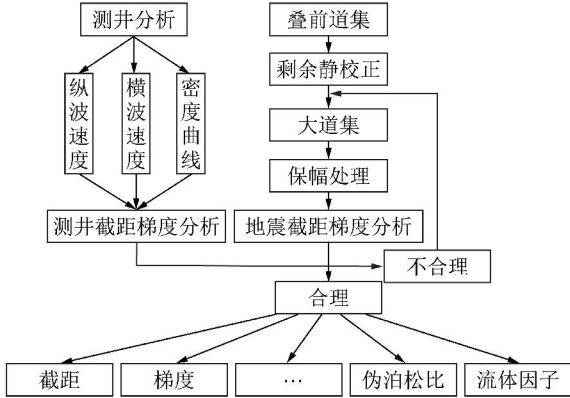


图 8 AVO 反演流程

Fig. 8 Flowchart of AVO inversion

在进行 AVO 反演时需要使用纵波、横波速度曲线等测井曲线,同时还需要知道伏青灰岩与大青灰岩层段含水饱和度信息,整理分析矿区内测井曲线时发现,缺少纵波速度和横波速度曲线,因此需要对矿区内测井曲线进行预处理。预处理的具体步骤已在模型建立部分详细介绍,这里不再赘述。

层位标定的目的是将实际地震记录中某一层位所对应的时间与测井曲线上对应深度建立关系。在进行层位标定前,需从实际地震记录中挑选出反射振幅强、反射波组连续性良好的层位。由图 9 可以看出:由于 2 号煤层与顶、底板岩层的波阻抗相差大,使得 2 号煤层顶、底板的地震反射波能量较强,而且 2 号煤层厚度较为稳定,反射波组连续性良好,因此可使用 2 号煤层顶、底板进行层位标定。伏青灰岩和大青灰岩岩溶含水层顶部均是砂岩层,而且石灰岩的波阻抗大于上部砂岩层波阻抗,根据反射系数计算公式可得,伏青灰岩与大青灰岩岩溶含水层顶界面的地震反射振幅为正。由于石灰岩与上部砂岩的波阻抗相差较大,因此石灰岩顶板反射波的反射能量也相对较强,反射波组连续性较好。在对 129 井进行层位标定时(图 10)发现:2 号煤底板在合成地震记录中位于 530 ms 处,对应于测井曲线上深度 890 m。伏青灰岩岩溶含水层顶板在地震记录中位于 580 ms 附近,对应于测井曲线深度为 938 m,大青灰岩岩溶含水层顶板在地震记录中位于 605 ms 附近,对应测井曲线深度为 960 m。

将 2 号煤层顶、底板作为研究对象,使用测井曲线进行 AVO 正演,并对 AVO 曲线进行截距与梯度分析,得到井合成地震 AVO 曲线。在对叠前地震数据体进行剩余静校正、大道集以及保幅处理后,在井旁地震道的实际地震记录中得到 2 号煤层顶、底板的 AVO 曲线,并对该曲线进行截距和梯度分析。将该

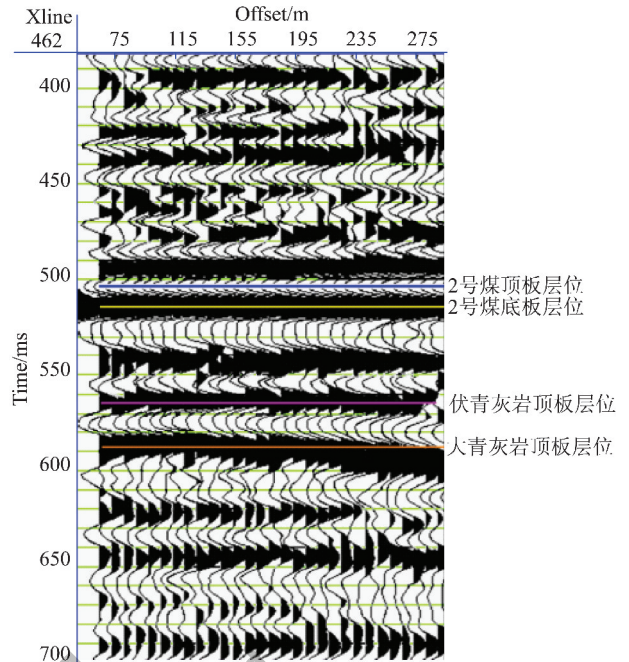
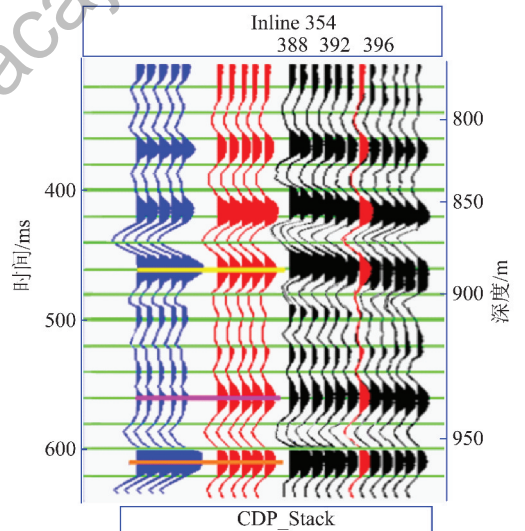


图 9 实际地震记录

Fig. 9 Plot of actual seismic records



▲ 合成地震记录 ▲ 井旁地震道地震记录 ▲ 实际地震记录
 — 2号煤层底板 — 伏青灰岩顶板 — 大青灰岩顶板

图 10 129 井层位标定

Fig. 10 Synthetic seismogram of 129 well

曲线与井地震 AVO 曲线进行对比,检验实际地震数据的保幅处理是否得当。以 129 号为例(图 11),由图中可以看出在井旁地震道的实际地震记录中得到 2 号煤层顶、底板的 AVO 曲线与测井曲线 AVO 模拟所得曲线相差较小,因此不再需要对实际地震数据进行重新处理,同时也表明了该矿区的的结果准确、可靠。最后反演出 AVO 截距属性与梯度属性数据,结合伪泊松比属性定义,从而得到伪泊松比属性数据体。

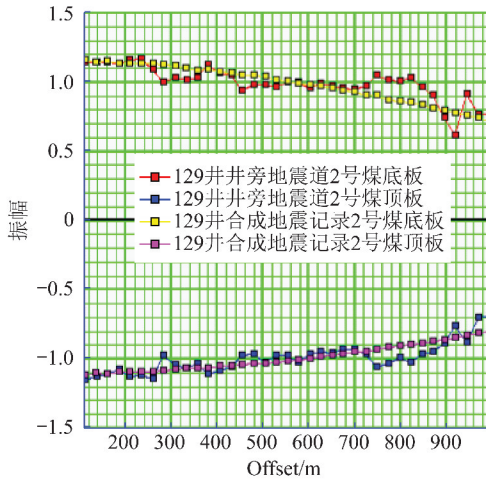


图 11 129 井正演与实际 AVO 曲线对比

Fig. 11 Comparison between AVO forward modeling curve and actual AVO curve of 129 well

3.2 富水性预测

由钻孔资料可知伏青灰岩与大青灰岩岩溶含水层分别位于 2 号煤底板下 77 m 和 108 m 处,结合地震数据处理时所得速度场信息,推测伏青灰岩大致位于 2 号煤底板下 50 ms 处,大青灰岩大致位于 2 号煤底板下 70 ms 处。在 AVO 反演所得伪泊松比属性数据体中,做出伏青灰岩岩溶含水层和大青灰岩岩溶含水层顶界面属性切片,从而得到图 12。

由预处理后的测井曲线可知,伏青灰岩岩溶含水层与大青灰岩岩溶含水层的含水饱和度在 80% ~ 100% 时,即矿区内伏青灰岩与大青灰岩岩溶含水层的含水饱和度较高。在参考《煤矿防治水规定》中关于含水层富水性分级标准后,根据羊东矿区实际资料揭露的含水层地质情况,结合伪泊松比属性与岩溶含水层富水性之间关系的结论认为:伪泊松比属性值在 0 ~ 3 000 表示富水性弱区域;3 000 ~ 5 500 为富水性中等区域;5 500 ~ 9 000 为富水性强区域。这里富水性弱的区域仅包含《煤矿防治水规定》中的弱富水性区域;富水性中等的区域仅包含《煤矿防治水规定》中的中等富水性区域;而富水性强的区域包含《煤矿防治水规定》中强富水性区域以及极强富水区域两部分。

由图 12(a)可知,伏青灰岩岩溶含水层富水性强区域(图中红色区域)主要分布于研究区东部,研究区西北部也有少量存在;富水性中等区域(图中黄色区域)分布极为分散,主要散布于富水性强的区域周围;富水性弱区域(图中蓝色区域)分布较为广泛,在研究区西部和中部相对集中,该岩溶含水层整体富水性不高。结合收集到的部分井下施工钻孔资料可知,位于研究区东北部 W3 钻孔,其涌水量为 48 m³/h,而

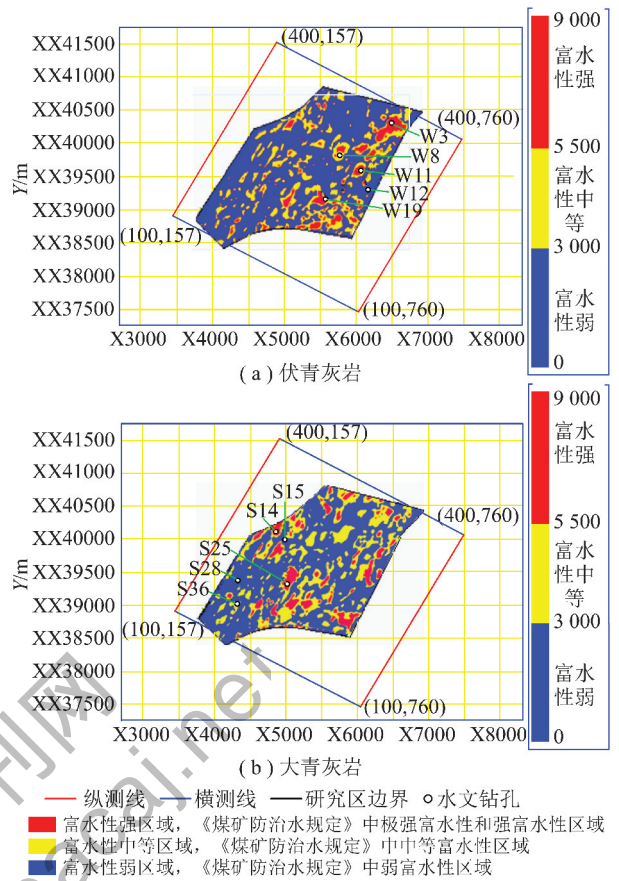


图 12 伏青灰岩和大青灰岩富水性预测

Fig. 12 Prediction of water abundance of Fuqing limestone and Daqing limestone

在研究区东部靠近中间区域的 W11 钻孔涌水量高达 82.8 m³/h 均为极强富水性区域;在研究区西南部的 W19 钻孔附近,测得涌水量为 15 m³/h,属于强富水性区域;在研究区中部 W8 钻孔附近,测量所得涌水量为 3 m³/h,属于中等富水性区域;而位于研究区东部中间位置的 W12 钻孔测得涌水量数据极低趋近于 0,属于弱富水性区域。这与富水性预测结果相吻合,从而证明了使用伪泊松比属性预测灰岩富水性结果的可靠。

由图 12(b)可知,大青灰岩岩溶含水层富水性强的区域(图中红色区域)主要分布于研究区东南部以及西北部,在东北部也有少量存在;富水性中等区域(图中黄色区域)主要分布于研究区东北部以及东南部,围绕于富水性强的区域周围,少量散布于研究区中部;富水性弱区域(图中蓝色区域)分布较为广泛,在研究区西部大量集中。在对比两图时发现大青灰岩岩溶含水层富水性要整体强于伏青灰岩岩溶含水层富水性。由收集到的部分井下施工钻孔资料可知,位于研究区北部靠近勘探边界附近的 S14 钻孔,其涌水量为 60 m³/h,属极强富水性;而位于研究区

中部的 S25 钻孔,其涌水量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$,属强富水性;位于研究区南部的 S36 钻孔,涌水量为 $1.98 \text{ m}^3/\text{h}$,属于中等富水性;在 S14 钻孔附近的 S15 钻孔测得的涌水量为 $0.06 \text{ m}^3/\text{h}$,和在研究区西南部的 S28 钻孔测量的涌水量数据趋近于 0 均属于弱富水性。这些钻孔的涌水量数据所揭示出的富水性强弱区域与富水性预测结果吻合程度较高,从而证明了使用伪泊松比属性进行富水性预测所得结果的准确与可靠。

4 结 论

(1)由伪泊松比属性预测羊东矿区灰岩富水性结果可知,伏青灰岩岩溶含水层整体富水性弱。富水性强的区域相对集中于研究区东部,在西北部有少量存在;富水性中等区域分布较为分散,散布于富水性强的区域周围;富水性弱的区域分布广泛主要集中于研究区中部以及西部。大青灰岩岩溶含水层整体富水性强于伏青灰岩岩溶含水层,富水性强的区域相对集中于研究区东南部以及西北部,东北部少量存在;富水性中等区域位于研究区东北部以及东南部,围绕于富水性强的区域周围,中部少量存在;富水性弱区域分布较为广泛,主要集中于研究区西部。

(2)使用收集得到的部分井下施工钻孔加以验证,发现这些钻孔的涌水量数据所揭示出的富水性强弱区域与富水性预测结果吻合程度较高,从而表明使用伪泊松比属性对灰岩岩溶含水层进行富水性预测这一方法是可行的。

(3)对于石灰岩、砂岩等孔隙度较大的岩石,使用 Gassmann 方程进行流体替换时发现当石灰岩含水饱和度在 $0 \sim 90\%$ 时,纵波速度会随着含水饱和度的增大而逐渐减小;当含水饱和度在 $90\% \sim 100\%$ 时,纵波速度骤然增大;岩石的横波速度会随着含水饱和度的增大而逐渐减小;当石灰岩含水饱和度在 $0 \sim 90\%$ 时,泊松比变化极少,而当含水饱和度在 $90\% \sim 100\%$ 时,泊松比骤然增大。

(4)根据羊东矿区所建模型,经正演模拟计算发现当石灰岩含水饱和度在 $0 \sim 90\%$ 时,石灰岩顶界面的伪泊松比属性值虽然缓慢增大,但是变化极小;当石灰岩含水饱和度在 $90\% \sim 100\%$ 时,该界面的伪泊松比属性值骤然增大。即在含水饱和度 $S_w = 0$ 时,伪泊松比属性值达到最小,而当含水饱和度 $S_w = 100\%$ 时,伪泊松比属性值达到最大。

(5)使用伪泊松比属性对羊东矿区内石灰岩岩溶含水层富水性强弱情况进行分级时,所得结果仅能表示富水性强弱,图中伪泊松比属性值不等于该灰岩岩溶含水层真实含水量值。

参考文献 (References):

- [1] 张丽红. 桃园矿区陷落柱及其富水性地球物理识别方法[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2012:5-8.
ZHANG Lihong. Geological identification methods of collapse column and its water yield property in Taoyuan mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012:5-8.
- [2] 刘德民,连会青,韩永,等. 基于概率神经网络的煤层顶板砂岩含水层富水性预测[J]. 煤炭技术,2014,33(9):336-338.
LIU Demin, LIAN Huiqing, HAN Yong, et al. Study on water enrichment prediction of coal roof sandstone aquifer based on PNN[J]. Coal Technology, 2014, 33(9):336-338.
- [3] 郑健,陈喜,张志才. 抽水试验法推求南方岩溶地区双重介质水文地质参数[J]. 工程勘察,2014(1):43-46.
ZHENG Jian, CHEN Xi, ZHANG Zhicai. Determination of hydrogeological parameters of double medium in south karst areas by using pumping tests [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2014(1):43-46.
- [4] 武强,许珂,张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报,2016,41(6):1341-1347.
WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on “three maps-two predictions” method for prediction on coal seam roof water bursting risk [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6):1341-1347.
- [5] 王怀洪,强孟东. 利用物探信息预测煤矿水害的方法探讨[J]. 山东煤炭科技,2006(4):50-52.
WANG Huaihong, QIANG Mengdong. Discussion about the prediction methods of mine water disaster with geophysical information [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2006(4):50-52.
- [6] 张丽红,师素珍,袁莉,等. 多属性技术在底板砂岩富水性预测中的应用[J]. 北京工业职业技术学院学报,2011,10(3):1-7.
ZHANG Lihong, SHI Suzhen, YUAN Li, et al. Application of seismic multi-attribute analysis to predicting water enrichment of sandstone coal floor [J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 2011, 10(3):1-7.
- [7] 董国明. 地球物理方法在矿山水文地质调查中的应用研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
DONG Guoming. A study of geophysical methods in mine hydrogeological investigation[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [8] 邹冠贵,彭苏萍,张辉,等. 地震波阻抗反演预测采空区孔隙度方法[J]. 煤炭学报,2009,34(11):1507-1511.
ZOU Guangui, PENG Suping, ZHANG Hui, et al. Predicting aquifer porosity of coal mine by impedance inversion [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11):1507-1511.
- [9] 李巧灵,彭苏萍,张辉,等. 基于 Wyllie 平均方程的煤系岩溶陷落带富水性预测[J]. 煤田地质与勘探,2014,42(1):49-52.
LI Qiaoling, PENG Suping, ZHANG Hui, et al. The water abundance prediction of karst collapse zone based on Wyllie time average equation [J]. Coal Geology and Exploration, 2014, 42(1):49-52.
- [10] 宋建国,王艳香,乔玉雷,等. AVO 技术进展[J]. 地球物理学进展,2008,23(2):508-514.
SONG Jianguo, WANG Yanxiang, QIAO Yulei, et al. Advance in AVO technique [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2):508-

- 514.
- [11] 殷八斤,曾灏,杨在岩. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,1995:68-76.
- [12] 陆基孟,王永刚. 地震勘探原理[M]. 东营:中国石油大学出版社,2014:347-351.
- [13] KOEFOED O. On the effect of Poisson's ratios of rock strata on the reflection coefficients of plane waves[J]. Geophysical Prospecting, 1955,3(4):381-387.
- [14] BORTFELD R. Approximation to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves[J]. Geophysical Prospecting, 1961,9(4):485-505.
- [15] AKI K, RICHARDS P. Quantitative seismology theory and methods[M]. USA, 1980:144-154.
- [16] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985,50(4):609-614.
- [17] 魏超,郑晓东,李劲松. 非线性 AVO 反演方法研究[J]. 地球物理学, 2011,54(8):2110-2116.
WEI Chao, ZHENG Xiaodong, LI Jinsong. A study on nonlinear AVO inverse method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(8):2110-2116.
- [18] 张丰麟,魏福吉,王彦春,等. 基于精确 Zoeppritz 方程三变量柯西分布先验约束的广义线性 AVO 反演[J]. 地球物理学报, 2013,56(6):2098-2115.
ZHANG Fenglin, WEI Fuji, WANG Yanchun, et al. Generalized linear AVO inversion with the priori constraint of trivariate Cauchy distribution based on Zoeppritz equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(6):2098-2115.
- [19] 孙秀华,王真理. 最优的 Zoeppritz 方程的简化综述[J]. 地球物理学进展, 2010,25(1):100-108.
SUN Xiuhua, WANG Zhenli. The optimal simplified Zoeppritz equation[J]. Progress in Geophysics, 2010,25(1):100-108.
- [20] 彭苏萍,高云峰,杨瑞召,等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探究和初步实践——以淮南煤田为例[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6):1475-1486.
PENG Suping, GAO Yunfeng, YANG Ruizhao, et al. Theory and application of AVO for detection of coalbed methane—A case from the Huainan coalfield[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(6):1475-1486.
- [21] 陈同俊,崔若飞,刘恩儒. VTI 型构造煤 AVO 正演模拟[J]. 煤炭学报, 2009,34(4):438-442.
CHEN Tongjun, CUI Ruofei, LIU Enru. AVO forward modeling for VTI coal[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(4):438-442.
- [22] 邓小娟,彭苏萍,林庆西,等. 基于各向异性的薄层 AVO 正演方法[J]. 煤炭学报, 2010,35(12):2053-2058.
DENG Xiaojuan, PENG Suping, LIN Qingxi, et al. AVO forward method of anisotropic thin coal bed[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(12):2053-2058.
- [23] 邓小娟,彭苏萍,杜文凤,等. 薄煤层 P-SV 转换波 AVO 正演研究[J]. 煤炭学报, 2012,37(1):62-66.
DENG Xiaojuan, PENG Suping, DU Wenfeng, et al. Converted wave AVO forward method of P-SV thin coal bed[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(1):62-66.
- [24] 张铁强,孙鹏远,钱忠平,等. 薄煤层 AVO 响应特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2013,48(4):597-603.
ZHANG Tieqiang, SUN Pengyuan, QIAN Zhongping, et al. Analysis of AVO response characteristics in thin coal bed[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013,48(4):597-603.
- [25] 渥·伊尔马兹. 地震资料分析——地震资料处理、反演和解释[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [26] 邹德江,于兴河,王晓畅,等. 油藏研究中测井曲线标准化优化方法探讨[J]. 石油地质与工程, 2007,21(4):55-57.
ZOU Dejiang, YU Xinghe, WANG Xiaochang, et al. Discussion on optimization method of well logging curve in reservoir research[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007,21(4):55-57.
- [27] 黄小平,柴婧. 阿尔奇公式在泥页岩地层含油饱和度计算中的应用——以沾化凹陷沙三段下亚段为例[J]. 油气地质与采收率, 2014,21(4):58-61.
HUANG Xiaoping, CAI Jing. The application of Archie formula in the calculation of oil saturation in the Slate stratum—A case study of the lower member of shahejie formation in Zhanhua Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4):58-61.
- [28] SMITH T M, SONDERGELD C H, Rai C S. Tutorial Gassmann fluid substitutions: A tutorial[J]. Geophysics, 2003, 68(2):430-440.
- [29] 张金强,曲寿利,孙建国,等. 一种碳酸盐岩储层中流体替换的实现方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010,45(3):406-409.
ZHANG Jinqiang, QU Shouli, SUN Jianguo, et al. A method of using fluid replacement in carbonate reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010,45(3):406-409.
- [30] 陈信平,霍全明,林建东,等. 煤层气储层含气量与其弹性参数之间的关系——思考与初探[J]. 地球物理学报, 2013,56(3):2837-2848.
CHEN Xiping, HUO Quanming, LIN Jiandong, et al. The relation between CBM content and the elastic parameters of CBM reservoirs; Reasoning and initial probing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(3):2837-2848.
- [31] 谭茂金,郭越,张松扬. 碳酸盐岩储层测井流体替换方法与应用分析[J]. 地球物理学进展, 2015,30(6):2772-2777.
TAN Maojin, GUO Yue, ZHANG Songyang. Fluid substitution method and application of well logging in carbonate reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2015,30(6):2772-2777.
- [32] 李景叶. 砂岩油藏地震数据流体替换[J]. 石油学报, 2012, 33(4):633-639.
LI Jingye. Fluid substitution based on seismic data of sand reservoirs[J]. Alta Petrolia Sinica, 2012,33(4):633-639.