

深部煤层气储层测井解释技术及应用

原俊红^{1,2},付玉通^{1,3},宋 昱¹

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116; 2.内蒙古大学 交通学院,
内蒙古 呼和浩特 010070; 3.中国石化华东油气分公司,江苏 南京 210000)

摘要:由于深部煤层取心资料和室内测试数据少,难以准确识别煤层煤体结构、显微组分、含气量与渗透率等关键参数,不利于煤层气有利开发区预测。为此,利用数理统计方法,将测井资料与实验室测试数据、现场注入压降试井数据对比分析,建立了研究区煤层参数测井解释模型,并应用该模型进一步对煤层进行综合评价。结果表明,煤岩工业组分、煤层含气量和渗透率测井模型计算结果误差分别为0~13.8%,1.9%~16.5%和4.2%~28.6%,证实模型可靠,具有较好的应用前景。根据测井解释模型分别计算研究区煤层厚度、渗透率、含气量及煤体结构等地质参数,根据这些参数将煤层分成I类、II类和III类,其中I类煤层理论产气量大于1 000 m³/d,为高产气区;II类煤层理论产气量大于500~1 000 m³/d,为中等产气区;III类煤层理论产气量小于500 m³/d,为低产气区。

关键词:深部煤层 测井解释 煤岩工业组分 含气量 渗透率 回归分析

中图分类号:P631.82

文献标识码:A

Logging interpretation technology and its application to deep coalbed methane reservoir

YUAN Junhong^{1,2},FU Yutong^{1,3},SONG Yu¹

(1.School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou City, Jiangsu Province, 221116, China; 2.Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia, 010070, China; 3.East China Company, SINOPEC, Nanjing City, Jiangsu Province, 210000, China)

Abstract: Since the coring data and indoor test data of deep coal seam are few, it is difficult to identify the key parameters of coal seam structure, maceral, gas content and permeability, which is not conducive to the prediction of favorable coalbed methane development zones. To solve this problem, the logging data were compared with the laboratory test data and the injection pressure drop testing data using the mathematical statistics method to compare. The log interpretation model of coal reservoir parameters was established and applied to further coal seam evaluation in the study area. The results show that the errors resulted from the logging model computation of components of coal industry, coalbed methane content and permeability logging are 0~13.8%, 1.9%~16.5% and 4.2%~28.6%, respectively. The model is effective and reliable and has a good application prospect. The geological parameters of coal seam thickness, permeability, gas content and coal seam structure in the study area were calculated. On this basis, the coal seam was divided into class I, II and III. The theoretical gas production is higher than 1 000 m³/d in the class I which is a high yield gas area; the theoretical gas production is between 500 and 1000 m³/d in the class II which is a medium gas producing area; and the theoretical gas production is less than 500 m³/d in the class III which is a low production area.

Key words: deep coal seam; logging interpretation; components of coal industry; gas content; permeability; regression analysis

收稿日期:2018-05-15。

作者简介:原俊红(1981—),男,山西清徐人,讲师,在读博士研究生,从事工程地质方面的研究。联系电话:18852146108, E-mail:yuanjunhong@cumt.edu.cn。

通讯作者:付玉通(1986—),男,山东曹县人,工程师,硕士。联系电话:18066900413, E-mail:fytxuzhidan@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“煤层气井地电法数据处理技术”(2011ZX05035)。

随着国家油气需求的增长与常规油气的逐步枯竭,煤层气作为一种非常规能源逐步受到重视。而煤层物性是决定煤层气富集和开采难易程度的主要因素,主要包括煤岩类型、煤质、煤体结构、含气量及渗透性等,对其开展研究,将有效指导煤层气开发部署^[1-4]。深部煤层取心、试井及煤岩分析等是获得煤层参数最直接的方法,但取心资料较少,难以满足生产和科研需要。而利用研究区丰富的测井资料,对煤层进行评价,具有快速直观、费用低的特点。如何利用测井数据准确评价煤层,中外学者进行了大量研究,并取得了一定成果。刘之的等利用有机融合各主控因素的手段建立了鄂东地区煤层气储层的测井定量评价方法^[5-6],邵先杰等研究了韩城地区补偿密度、声波时差与煤层工业组分之间的关系^[7],李朋朋等分析了不同变质状态的煤与吸附时间的关系^[8],伊伟等对韩城地区煤层特征及煤层气的含量进行了评估^[9],另外,在利用测井资料评价煤体结构、裂隙条件下测井参数的解释及储层的评估与改造等方面,均取得了较好成效^[10-16],还有一些学者运用神经网络法、综合因素法及权重法对储层进行了评价^[17-18]。PENG等利用测井资料对煤层产气能力进行了计算^[19-20]。

煤层具有双重孔隙结构和三相介质流动状态、低孔低渗透和非均质性强的特点,使得煤层测井解释具有复杂性和多解性^[21]。而且前人相关研究主要集中在埋深在1 000 m以上的中—浅部煤层,1 000 m以下深部煤层的测井评价则涉及较少^[22]。深部煤层处于高地应力、高地温及高矿化度的地质条件下^[23],煤层孔隙结构与中—浅部的存在较大差异,前人研究成果是否适用于深部煤层和常规测井、测试精度是否能够有效反映煤层特征还有待验证。目前中外煤层气勘探开发正逐步向深部扩展,为此,以鄂尔多斯盆地东南部YCN区块二叠系山西组2号煤层为研究对象,建立一套利用测井资料综合评价深部煤层的方法,以期对煤层气开发决策和选区部署提供依据。

1 区块地质概况

YCN区块位于鄂尔多斯盆地东南部,构造上处于渭北隆起与晋西挠褶带交汇处,面积约为701 km²。区块内地质构造相对简单,整体为一走向呈NE—NNE、倾向为NW的单斜构造,区内褶皱相对不发育。研究区内主要发育4条二级断层,断层走向以NNW和NW为主,倾角为40°~60°,断距为

25~60 m。

区内山西组2号煤层为主采煤层,埋深为1 210~1 450 m,平均为1 310 m,自ES向WN埋深加大(图1),埋深主要受构造控制;煤层厚度为2.6~7.1 m,平均为4.1 m;镜质组反射率为2.1%~3.0%,平均为2.5%,以贫煤和无烟煤为主。煤层压力为5.0~10.1 MPa,储层压力系数为0.7~0.9,地应力为8.9~21.2 MPa。煤层温度为31.5~45.4℃,平均为38.4℃,地温梯度为1.11~1.47℃/hm。煤层水矿化度普遍大于10 g/L,水型以CaCl₂型为主^[24]。与浅部煤层相比,研究区煤层具有储层温度高、矿化度高、煤变质程度高和地应力大的特点^[25]。

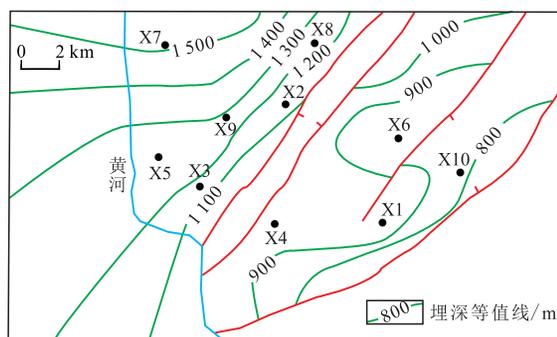


图1 YCN区块山西组2号煤层埋深等值线

Fig.1 Contour map of burial depth of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

2 煤层测井响应特征

选取YCN区块148口煤层气井煤层段测井响应数值进行统计,得到各测井参数的频数分布(图2)。由图2可知,自然伽马(*GR*)为50~80 API,平均为65 API。煤层中放射性物质主要吸附于灰分表面,因而自然伽马能够反映煤层中灰分含量^[12]。深侧向电阻率(*LLD*)为350~11 000 Ω·m,数值分布范围较广,受地层水矿化度、煤岩工业组分、煤层裂隙发育情况和煤层含气量等多重因素影响。声波时差(*AC*)为370~420 μs/m,声波时差越小,声波速度越高,煤层越致密。补偿中子(*CNL*)主要为45%~60%,在一定程度上可以反映煤层割理和大孔隙中煤层水含量。密度(*DEN*)主要为1.35~1.65 g/cm³,密度越小,矿物质含量越低,煤质越纯。井径(*CAL*)主要为22~28 cm,具有明显的扩径现象。而浅部煤层深侧向电阻率为300~6 500 Ω·m,补偿中子为32%~46%,密度为1.25~1.45 g/cm³,声波时差为390~440 μs/m。与浅部煤层相比,深部煤层测井响应具有高电阻率、高中子、低声波时差、高密度的典型特征^[14]。

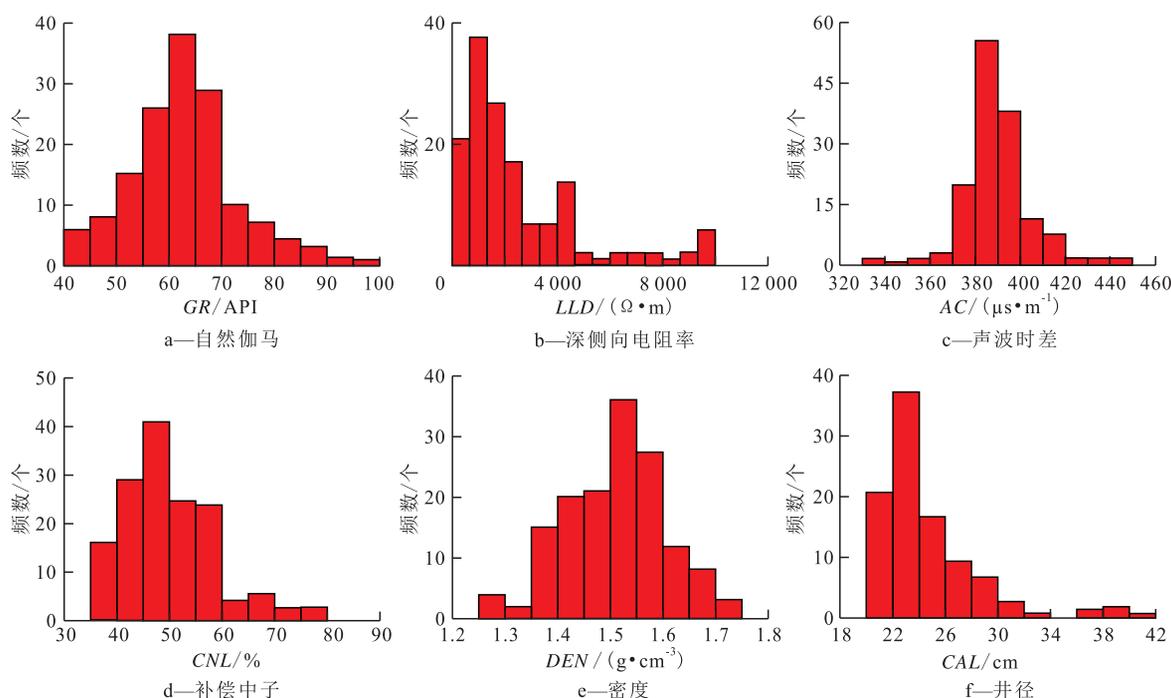


图2 YCN区块二叠系山西组2号煤层测井参数频数分布

Fig.2 Frequency histograms of geophysical logging data of No.2 coal seam in Permian Shanxi Formation in Block YCN

3 煤层测井评价

基于深部煤层与浅部煤层测井响应特征存在较大差异,在前人研究基础上,利用数理统计法定量表征煤岩工业组分、煤层含气量和渗透率等关键参数,利用交会图法识别煤体结构,划分不同煤层类型,总结不同煤层类型的测井响应特征,预测其产气能力。

3.1 煤岩工业组分

煤岩工业组分是煤质评价的基础,主要包括水

分、灰分、挥发分和固定碳等,各组分含量主要通过煤样工业分析实验求取。对研究区内10口井23块煤样进行工业分析实验。根据实验结果(表1),对灰分和其他组分进行回归分析,发现灰分与固定碳和水分之间具有良好的线性相关性,但与挥发分之间相关性较差(图3)。因此,仅需利用测井曲线拟合出灰分含量,即可计算出其他组分含量。

通过相关分析发现,灰分含量与自然伽马相关性最好,与声波时差相关性中等,与密度相关性较差(图4)。前人研究表明,灰分主要为泥质成分,灰分含量越高,煤层放射性越强,自然伽马值越大,因

表1 YCN区块山西组2号煤层煤岩工业组分及测井属性统计

Table1 Components of coal industry and logging attributes statistics of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

井号	灰分含量/%	固定碳含量/%	水分含量/%	挥发分含量/%	GR/API	LLD/(Ω·m)	AC/(μs·m ⁻¹)	DEN/(g·cm ⁻³)
X1	12.81	78.34	0.80	8.05	61.5	164.9	407.5	1.39
X2	14.69	75.85	0.97	8.50	81.9	885.0	367.4	1.55
X3	11.12	79.32	0.88	8.68	52.4	136.0	360.3	1.62
X4	18.81	70.81	1.10	9.28	75.8	1 780.5	399.1	1.50
X5	11.44	79.20	0.93	8.43	52.2	1 065.5	395.0	1.38
X6	9.28	80.08	0.87	9.77	69.9	908.7	393.9	1.37
X7	10.96	79.21	0.96	8.87	35.4	2 628.9	395.2	1.26
X8	16.10	75.03	0.83	8.04	95.4	1 496.8	369.7	1.60
X9	7.89	81.18	0.91	10.02	25.9	2 814.7	398.8	1.41
X9	7.72	82.19	0.75	9.34	58.1	240.2	329.0	1.43
X9	9.36	84.15	0.90	5.59	29.1	1 269.2	393.3	1.22
X10	7.71	82.32	0.61	9.36	41.1	334.4	377.3	1.43

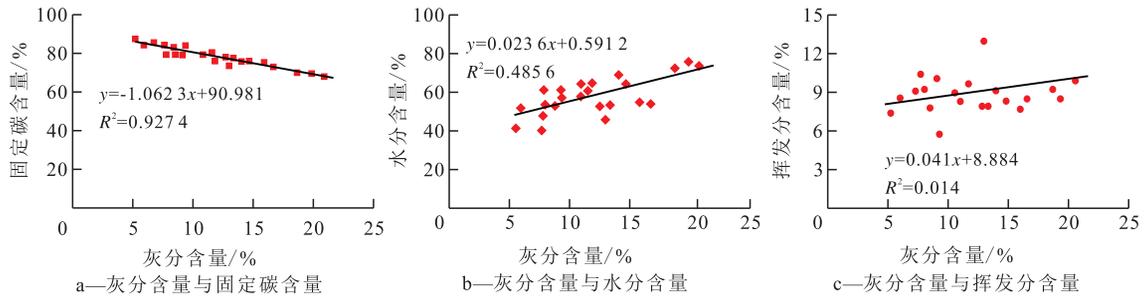


图3 YCN区块山西组2号煤层灰分含量与固定碳、水分、挥发分含量交会图

Fig.3 Cross plots of ash content vs. fixed carbon, moisture and volatile matter of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

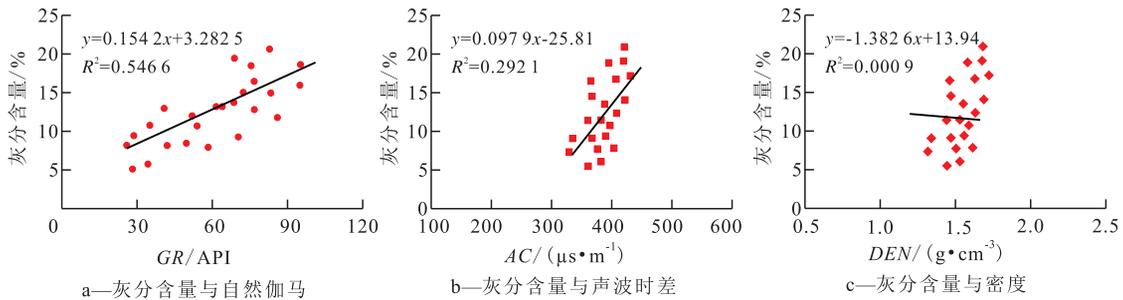


图4 YCN区块山西组2号煤层灰分含量与自然伽马、声波时差和密度交会图

Fig.4 Cross plots of ash content vs. GR, DT and DEN of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

此选用自然伽马拟合计算煤层灰分含量^[11,20]。拟合公式为

$$M_{Aad} = 0.1542GR + 3.2825 \quad (1)$$

固定碳和水分含量计算公式分别为

$$M_{FC} = -1.0623M_{Aad} + 90.981 \quad (2)$$

$$M_{Md} = 0.0236M_{Aad} + 0.5912 \quad (3)$$

其中

$$M_{Vdaf} + M_{Aad} + M_{FC} + M_{Md} = 100\% \quad (4)$$

由式(2)一式(4)得挥发分含量计算公式为

$$M_{Vdaf} = 1.0387M_{Aad} - 90.5722 \quad (5)$$

式中: M_{Aad} , M_{FC} , M_{Md} 和 M_{Vdaf} 分别为空气干条件下灰分、固定碳、水分和挥发分含量,%; GR 为自然伽马,API。

3.2 煤体结构

煤体结构指煤层各组成部分颗粒大小、形状及其组合关系,按破碎程度不同,可分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤4类。煤体结构对煤层的渗透性和可改造性有重要影响。其中,原生结构煤和碎裂煤的孔隙-裂隙保存较好,煤质较硬,煤层原始渗透性较高,易于压裂改造,有利于煤层气产出;碎粒煤和糜棱煤的孔隙-裂隙基本被破坏,煤质较软,煤层原始渗透性差且难以压裂改造,不利于煤层气产出。

不同煤体结构煤层的煤岩密度、强度及孔隙-裂隙发育情况等存在明显差异,其测井响应特征存

在明显差别,因而可以根据测井曲线形态和测井属性交会图识别煤体结构。从曲线形态上看,原生结构煤和碎裂煤具有低自然伽马、低密度、高深侧向电阻率和扩径不明显的特点;碎粒煤和糜棱煤具有高自然伽马、高密度、低深侧向电阻率的特点。煤体结构破碎程度越严重,煤层中泥质含量越高、煤层越致密、煤层渗透性越差^[19](图5)。从(图6a)可以看出,原生结构煤和碎裂煤位于交会图左下部,

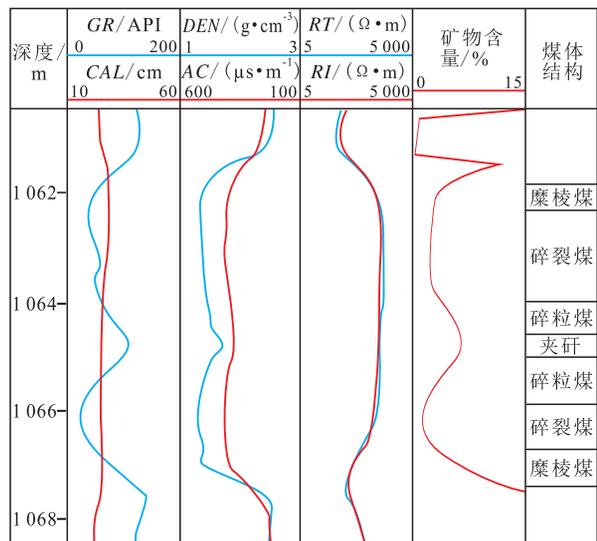


图5 YCN区块山西组2号煤层煤体结构测井解释综合曲线

Fig.5 Comprehensive logging curves of coal seam structure of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

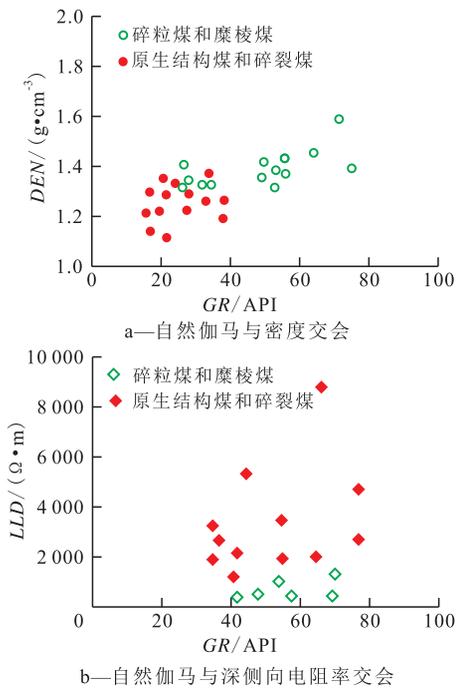


图6 YCN区块山西组2号煤层煤体结构测井属性交会图

Fig.6 Cross plots of logging attributes for different coal seam structures of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

碎粒煤和糜棱煤位于交会图右上部。部分原生结构煤和碎裂煤与碎粒煤和糜棱煤无法区别,将其投至自然伽马与深侧向电阻率交会图上,原生结构煤和碎裂煤位于交会图上部,碎粒煤和糜棱煤位于交会图下部(图6b)。因而,通过自然伽马与密度和自然伽马与深侧向电阻率交会图能够很好地识别出煤层煤体结构。前人研究表明:煤体结构越破碎,煤层矿物质含量越高,导致煤层导电性能变好,电阻率变差;矿物主要成分为粘土,容易混入放射性物质,使得自然伽马与破碎程度呈正相关^[20]。

3.3 煤层含气量

根据煤样现场解吸数据,研究区煤层含气量最高值为 24.2 m³/t,最低值为 8.1 m³/t,平均为 15.5 m³/t,且不同区域间差异较大。煤层含气量是影响煤层气井产气量和煤层气资源量评价的重要参数,煤层气主要以吸附态赋存于煤基质表面,常规实验测试方法不仅耗时较长,成本较高,且仅极个别探井进行含气量测试,远远满足不了生产与科研需要。目前,煤层含气量评价方法有利用密度曲线的 Mavor 公式^[21]、基于朗格缪尔方程发展而来的朗氏煤阶方程、煤层工业组分拟合法和测井参数回归拟合法。鉴于以目前测井仪器精度水平,无法利用单一测井曲线对含气量做出准确解释,因而通过多元回归分析法,建立多测井曲线综合解释煤层含气量模型。其步骤为:①利用一元法拟合煤层含气量,发现煤

层含气量与自然伽马和密度呈线性负相关,相关性较好,与其他测井参数相关性较差(图7)。②利用自然伽马和密度对含气量进行二元拟合,建立煤层含气量多元拟合模型。③鉴于煤层含气量与单一测井数据相关性较低,为提高拟合精度,基于多元线性回归方法,建立含气量与自然伽马和密度之间的关系式,即

$$GC = 48.9665 - 0.1256GR - 18.3939DEN \quad (6)$$

式中:GC 为含气量, m³/t; DEN 为密度, g/cm³。

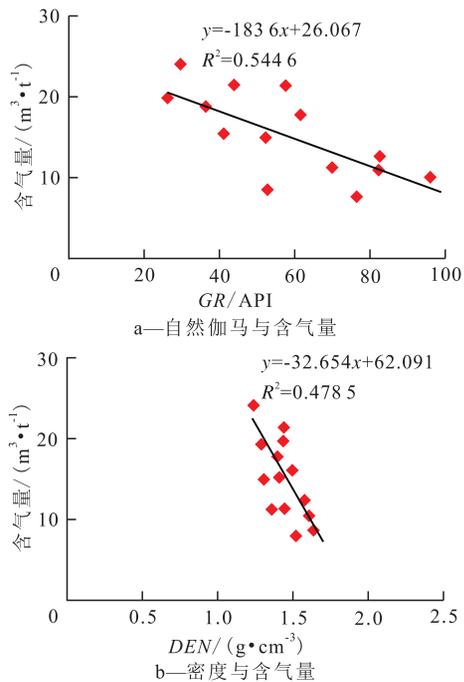


图7 YCN区块山西组2号煤层含气量与自然伽马和密度交会图

Fig.7 Cross plots of gas content vs. GR and DEN of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

3.4 煤层渗透率

煤层渗透率是控制煤层气井产气能力最重要的参数,在煤层气开采评价中至关重要。研究区煤层渗透率主要通过注入压降测试获得,费用昂贵,且测试数量较少,难以满足煤层气开发评价需要,利用测井资料准确评价煤层渗透性具有重要的指导意义。煤层渗透率主要受煤层割理-裂隙发育情况和裂隙连通情况影响,割理-裂隙越发育,连通性能越好,煤层渗透率越高^[22]。在地应力作用下,裂缝逐渐趋于闭合,煤层渗透率急剧下降;煤层裂隙越发育,声波传播速度越慢,甚至产生周波跳跃现象。因而可以利用测井资料评价煤层所受有效应力和裂隙发育情况,并拟合计算煤层渗透率(图8),拟合公式为

$$K = 0.0089(AC_{\text{煤层}} - AC_{\text{泥岩}}) - 1.015 \quad (7)$$

式中:K 为煤层渗透率, mD; AC_{煤层}, AC_{泥岩} 分

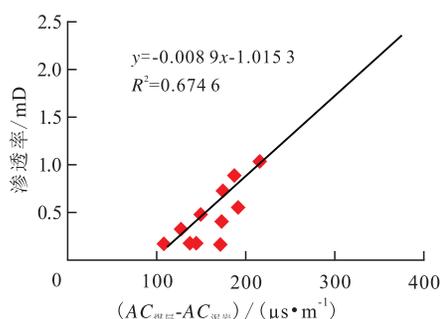


图8 YCN区块山西组2号煤层渗透率与声波时差交会图

Fig.8 Cross plot of permeability vs. AC of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

别为煤层和泥岩声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

3.5 煤层综合评价与应用

煤层气井产气能力与煤层含气量和渗透率呈正相关,与灰分含量呈负相关,此外还受煤体结构影响,其中含气量与自然伽马和密度呈负相关,渗透率与声波时差呈正相关,灰分含量与自然伽马呈正相关,因此可以推断出煤层产气能力与声波时差

呈正相关,与自然伽马和密度呈负相关,可以只利用声波时差、自然伽马和密度3条曲线定性判断煤层产气能力。

为验证上述评价方法的有效性,将测井解释结果与实验数据进行对比(表2),发现煤岩工业组分中灰分、固定碳含量的计算值与实验室测试含量的误差分别为0~13.8%和0.4%~4.9%,平均误差分别为5.4%和2.2%;测井解释含气量与现场解吸数据相比误差为1.9%~16.5%;测井解释渗透率与注入压降测试解释结果相比,存在4.2%~28.6%的误差。总体而言,煤层气储层测井解释模型计算结果可靠,具有较好的实用性,可以用来评价研究区煤层煤质、煤体结构、煤层含气量与渗透率等关键参数,进而定性判断煤层气井产能高低。

根据测井解释模型分别计算研究区煤层厚度、渗透率及含气量等地质参数,然后根据这些参数将煤层分成I类、II类和III类,从图9可以看出,I类煤层主要位于与断层距离适中的X3,X9,X7,X1和

表2 YCN区块二叠系山西组2号煤层属性测井解释结果与实验测试结果对比
Table2 Comparison of log interpretation results of coal properties with experimental test results

井名	灰分含量/%			固定碳含量/%			含气量			渗透率		
	实测	计算	相对误差	实测	计算	相对误差	实测/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	计算/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	相对误差/%	实测/mD	计算/mD	相对误差/%
X1	12.8	12.8	0	78.3	77.5	1.0	16.0	15.7	1.9	0.88	0.79	10.2
X2	14.7	15.7	6.8	75.9	74.4	2.0	9.7	11.3	16.5	0.14	0.18	28.6
X3	11.1	11.6	4.5	79.3	78.8	0.6	16.7	15.3	8.4	0.81	0.76	6.2
X5	11.4	11.6	1.8	79.2	78.9	0.4	14.3	15.1	5.6	0.11	0.12	9.1
X6	12.3	14.0	13.8	80.1	76.2	4.9	14.2	15.0	5.6	0.27	0.31	14.8
X7	11.0	10.2	7.3	79.2	81.4	2.8	19.2	21.3	10.9	0.38	0.41	7.9
X8	16.1	17.5	8.7	75.0	72.3	3.6	8.2	7.5	8.5	0.32	0.35	9.4
X9	7.9	7.9	0	81.2	82.8	2.0	20.2	19.8	2.0	0.48	0.5	4.2

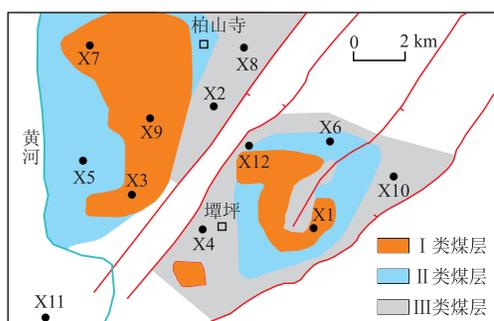


图9 YCN区块山西组2号煤层各类煤层平面分布
Fig.9 Horizontal distribution of coal seam of Class I, II and III of No.2 coal seam in the Shanxi Formation in Block YCN

X6等井区,含气量和渗透率均较高;III类煤层主要分布在断层附近的X2,X8,X4和X10等井区,这些区域煤层因裂缝发育导致煤层气大量逸散,含气量

极低;其他区域主要为II类煤层,煤层含气量中等,渗透率较低。

I类煤层煤体结构以原生结构和碎裂煤为主,测井解释含气量大于 $15 \text{ m}^3/\text{t}$,且渗透率大于 0.3 mD ,煤层厚度大于 4.0 m ,单井理论产气量大于 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$,为高产气区,该区内共有煤层气井352口,单井产气量为 $623 \sim 3285 \text{ m}^3/\text{d}$,平均单井产气量为 $1380 \text{ m}^3/\text{d}$,其中单井产气量大于 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的井为303口,符合率为86%;II类煤层煤体结构以碎裂煤和碎粒煤为主,含气量为 $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{t}$,渗透率为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mD}$,且单井理论产气量为 $500 \sim 1000 \text{ m}^3$,为中等产气区,该区内有煤层气井295口,单井产气量为 $385 \sim 1105 \text{ m}^3/\text{d}$,平均单井产气量为 $670 \text{ m}^3/\text{d}$,其中263口井产气量为 $500 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{d}$,符合率为89%;

Ⅲ类煤层煤体结构以碎粒煤和糜棱煤为主,含气量小于 $10\text{ m}^3/\text{t}$ 或渗透率小于 0.1 mD ,理论单井产气量小于 $500\text{ m}^3/\text{d}$,为低产气区,该区共有煤层气井243口,单井产气量为 $0\sim 582\text{ m}^3/\text{d}$,平均单井产气量为 $350\text{ m}^3/\text{d}$,其中233口井产气量小于 $500\text{ m}^3/\text{d}$,符合率达96%。

4 结论

深部煤层自然伽马为 $50\sim 80\text{ API}$,深侧向电阻率为 $350\sim 11\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,声波时差主要为 $370\sim 420\ \mu\text{s}/\text{m}$,补偿中子主要为 $45\%\sim 60\%$,具有低自然伽马、高电阻率、低声波时差和高中子的典型测井响应特征。利用测井解释模型分别计算了煤岩工业组分中灰分、煤层气含量和渗透率,误差分别为 $0\sim 13.8\%$, $1.9\%\sim 16.5\%$ 和 $4.2\%\sim 28.6\%$,误差较小,表明模型可靠,具有广泛的应用前景。根据测井解释模型解释的煤层参数,将煤层分成Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类,研究了3类煤层分布规律,统计了3种不同煤层产气量分布范围,为下一步煤层气勘探开发部署指明了方向。

参考文献:

- [1] 徐祖新,姜文亚,刘海涛.常规与非常规油气关系研究现状与发展趋势[J].油气地质与采收率,2016,23(3):14-19.
XU Zuxin,JIANG Wenya,LIU Haitao.Research status and development tendency of the relationship between conventional and unconventional oil and gas[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(3):14-19.
- [2] 陈刚,秦勇,李五忠,等.鄂尔多斯盆地东部深层煤层气成藏地质条件分析[J].高校地质学报,2012,18(3):465-473.
CHEN Gang,QIN Yong,LI Wuzhong,et al.Analysis of geological conditions of deep coalbed methane reservoiring in the eastern Ordos Basin[J].Geological Journal of China Universities,2012,18(3):465-473.
- [3] 郭伟.延川南煤层气田基本特征与成藏关键因素[J].石油实验地质,2015,37(3):341-346.
GUO Wei.Basic characteristics and key factors of gas accumulation in Yanchuannan coalbed gas field[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(3):341-346.
- [4] 杨显成,蒋有录,杨昕睿,等.煤层气含量的主控因素——以卡拉哈里盆地XX区块为例[J].油气地质与采收率,2018,25(1):1-5.
YANG Xiancheng,JIANG Youlu,YANG Xinrui,et al.Study on main controlling factors of the coalbed methane content: A case study of Block XX in Kgalahari Basin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(1):1-5.
- [5] 刘之的,赵靖舟,时保宏,等.煤层气储层“三品质”测井定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例[J].天然气地球科学,2015,26(5):966-978.
LIU Zhidi,ZHAO Jingzhou,SHI Baohong,et al.Study on the method of quantitative evaluation for “three qualities” of CBM reservoir using logging data: A case study from the Hancheng mine at the eastern edge of the Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience,2015,26(5):966-978.
- [6] 刘之的,杨秀春,张继坤,等.鄂东气田煤层含气量测井预测[J].地质科技情报,2014,33(1):95-99.
LIU Zhidi,YANG Xiuchun,ZHANG Jikun,et al.Logging predicting for coalbed gas content in Eastern Block of Ordos Basin[J].Geological Science and Technology Information,2014,33(1):95-99.
- [7] 邵先杰,孙玉波,孙景民,等.煤岩参数测井解释方法——以韩城矿区为例[J].石油勘探与开发,2013,40(5):559-565.
SHAO Xianjie,SUN Yubo,SUN Jingmin,et al.Logging interpretation of coal petrologic parameters: A case study of Hancheng mining area[J].Petroleum Exploration and Development,2013,40(5):559-565.
- [8] 李朋朋,张小东,杨延辉,等.不同变形程度煤的吸附时间及其影响因素[J].油气地质与采收率,2017,24(4):43-48.
LI Pengpeng,ZHANG Xiaodong,YANG Yanhui,et al.Adsorption time of coals with different degrees of deformation and their influencing factors[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(4):43-48.
- [9] 伊伟,熊先钺,卓莹,等.韩城矿区煤储层特征及煤层气资源潜力[J].中国石油勘探,2017,22(6):78-86.
YI Wei,XIONG Xianyue,ZHUO Ying,et al.Coal reservoirs and CBM potentials in Hancheng mining area[J].China Petroleum Exploration,2017,22(6):78-86.
- [10] 陶传奇,王延斌,倪小明,等.基于测井参数的煤体结构预测模型及空间展布规律[J].煤炭科学技术,2017,45(2):173-177,196.
TAO Chuanqi,WANG Yanbin,NI Xiaoming,et al.Prediction model of coal-body structure and spatial distribution law based on logging parameters[J].Coal Science and Technology,2017,45(2):173-177,196.
- [11] 张超,黄华州,徐德林,等.基于测井曲线的煤体结构判识[J].煤炭科学技术,2017,45(9):47-51.
ZHANG Chao,HUANG Huazhou,XU Delin,et al.Coal structure identified based on logging curve[J].Coal Science and Technology,2017,45(9):47-51.
- [12] 金泽亮,薛海飞,高海滨,等.煤层气储层测井评价技术及应用[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):42-45.
JIN Zeliang,XUE Haifei,GAO Haibin,et al.Technology for evaluation of CBM reservoir logging and its application[J].Coal Geology & Exploration,2013,41(2):42-45.
- [13] 赵毅,毛志强,孙伟,等.煤层气储层非常规测井资料评价方法研究[J].测井技术,2011,35(5):441-446.
ZHAO Yi,MAO Zhiqiang,SUN Wei,et al.Evaluation method for unconventional log data of CBM reservoir[J].Well Logging Technology,2011,35(5):441-446.
- [14] 黄兆辉,邹长春,杨玉卿,等.沁水盆地南部TS地区煤层气储层

- 测井评价方法[J].现代地质,2012,26(6):1 275-1 281.
- HUANG Zhaohui, ZOU Changchun, YANG Yuqing, et al. Coalbed methane reservoir evaluation from wireline logs in TS District, southern Qinshui Basin [J]. *Geoscience*, 2012, 26 (6) : 1 275-1 281.
- [15] 苗清, 秦华明, 刘江, 等. 裂缝识别测井技术开发与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(6): 138-143.
- MIAO Qing, QIN Huaming, LIU Jiang, et al. Development of fracture identifying well-logging technique and its application [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(6) : 138-143.
- [16] 张杨, 王振兰, 范文同, 等. 基于裂缝精细评价和力学活性分析的储层改造方案优选及其在博孜区块的应用[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 47-58.
- ZHANG Yang, WANG Zhenlan, FAN Wentong, et al. Optimization of reservoir stimulation scheme based on fine fracture evaluation and mechanical activity analysis and its application in Bozi block [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(6): 47-58.
- [17] 梁红艺, 谢小国, 罗兵, 等. 煤层含气量评价方法研究与应用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 44-47.
- LIANG Hongyi, XIE Xiaoguo, LUO Bing, et al. Coalbed methane content evaluation and application [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(3): 44-47.
- [18] 张玲, 魏绍蕾, 黄学斌, 等. 基于综合权重法的页岩气储量评价方法探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 694-699.
- ZHANG Ling, WEI Shaolei, HUANG Xuebin, et al. Shale gas reserve quality evaluation based on a comprehensive weighting method [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5) : 694-699.
- [19] PENG Cheng, ZOU Changchun, ZHOU Tianning, et al. Factors affecting coalbed methane (CBM) well productivity in the Shizhuangnan block of southern Qinshui basin, North China: Investigation by geophysical log, experiment and production data [J]. *Fuel*, 2017, 191: 427-441.
- [20] GAN Thomas, BALMAIN Brendan, SIGBATULLIN Artem. Formation evaluation log-off results comparing new generation Mining style logging tools to conventional oil and gas logging tools for application in coalbed methane (CBM) field development [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 34: 1 237-1 250.
- [21] LIU Huihu, SANG Shuxun, WANG Geoff G X, et al. Block scale investigation on gas content of coalbed methane reservoirs in southern Qinshui basin with statistical model and visual map [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2014, 114(2): 1-14.
- [22] 刘成林, 朱杰, 车长波, 等. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 130-132.
- LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, et al. Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China [J]. *Nature Gas Industry*, 2009, 29(11) : 130-132.
- [23] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48-54.
- QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1) : 48-54.
- [24] 陈刚, 胡宗全, 苏坤, 等. 鄂东南延川南深煤层煤体结构与产气量关系分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 107-112.
- CHEN Gang, HU Zongquan, SU Kun, et al. Analysis on relationship between coal structure and gas production quantity in deep coal seam of Yanchuannan Area at Southeast Ordos [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(12) : 107-112.
- [25] 熊先钺, 边利恒, 王伟, 等. 韩城区块煤储层间接压裂地质主控因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 189-195.
- XIONG Xianyue, BIAN Liheng, WANG Wei, et al. Research on main geological controlling factors of coal reservoir indirect fracturing in Hancheng Block [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6) : 189-195.

编辑 单体珍