

柴达木盆地北缘柴页1井中侏罗统大煤沟组页岩储层测井评价

王胜建¹, 包书景¹, 梅建森², 梅岩辉¹, 潘洪峰², 汪大明¹

WANG Shengjian¹, BAO Shujing¹, MEI Jiansen², MEI Yanhui¹, PAN Hongfeng², WANG Daming¹

1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

2. 中国石油青海油田勘探事业部, 甘肃 敦煌 736202

1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;

2. Exploration and Development Department of Qinghai Oilfield, CNPC, Dunhuang 736202, Gansu, China

摘要:页岩储层测井评价是后期压裂改造工程的基础,通过分析柴页1井常规测井曲线特征,结合特殊测井和岩心样品分析化验数据,综合评价了中侏罗统大煤沟组页岩岩性、物性、地球化学、含气性、可压裂性等特征,获得了储层评价及工程改造参数。柴页1井中侏罗统大煤沟组至少发育128.1m厚的富有机质页岩,具有高伽马、高声波时差、高中子、高电阻、低密度的特点;测井计算有利的富有机质页岩的总有机碳含量介于3.20%~4.20%之间,总含气量介于1.50~4.50m³/t之间,有利页岩层段脆性矿物含量介于45%~75%之间,划分出3个有利层组,第I层组和第II层组具有杨氏模量高、泊松比低的特点,有利于后期射孔压裂。

关键词:中侏罗统;页岩气;测井;压裂

中图分类号:P534.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2016)02/03-0260-13

Wang S J, Bao S J, Mei J S, Mei Y H, Pan H F, Wang D M. Shale petrophysical evaluation of the Middle Jurassic Dameigou Formation in Chaiye1 Well, Qaidam Basin. *Geological Bulletin of China*, 2016,35(2/3):260-272

Abstract: Petrophysical evaluation of shale reservoirs is the basis of the fracturing project. The drilling project of Chaiye 1 well was organized by China Geological Survey in 2013. The results of conventional logging and element capture spectroscopy of Chaiye 1 well provided data for shale gas exploration and development of Qaidam Basin. Based on the open hole logging data, core analysis data, lithology, physical properties, geochemical characteristics, gas-bearing properties and geomechanics, this paper has summarized reservoir evaluation and fracturing characteristics. The organic-rich shale with high gamma, high acoustic, high neutron, high resistivity, low density features at least has the thickness of 128.1m, the total organic carbon content is between 3.20% and 4.20%, the total gas content is between 1.50~4.50m³/t, and the brittle mineral content is between 45% and 76%, as shown by the result of petrophysical evaluation. In addition, three potential layers are recognized in Chaiye1 well, with the shale in I and II intervals characterized by high Young's modulus and low Poisson's ratio being most favorable for perforation optimization design.

Key words: Middle Jurassic; shale gas; logging; fracturing

页岩气井产能的高低依赖于页岩储层品质和水力压裂措施,而页岩储层测井评价能提供准确的矿物组成、总有机碳含量(TOC)、孔隙度、饱和度、岩石力学等参数,为有利储层优选及水力压裂方案

设计提供依据^[1-3]。北美地区早期利用自然伽马、电阻率、中子、密度、声波等常规测井系列建立了页岩气测井评价方法,一些特殊测井(如核磁共振、元素俘获、介电扫描等)也用于非常规储层评价^[4]。目前最常

收稿日期:2015-03-09;修订日期:2015-11-23

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011221045、12120113040000)

作者简介:王胜建(1980-),男,硕士,工程师,石油地质专业。E-mail: wshj0908@163.com

通讯作者:包书景(1964-),男,硕士,教授级高工,从事页岩气地质综合研究。E-mail: bsj6477@126.com

用的密度、伽马能谱、交叉偶极子横波、高分辨率电阻率成像的测井组合能够为储层评价提供关键参数和完整的数据信息^[5]。国外石油公司在 Marcellus、Haynesville、Barnett 页岩勘探阶段,除采用自然伽马、岩性密度、中子、声波、电阻率等常规测井外,也开展了地球化学、偶极声波成像等特殊测井^[6~9]。四川盆地是目前中国页岩气勘探开发的重点地区,也是最成功的地区^[10],在焦石坝、长宁—威远及渝东南地区的页岩气勘探阶段均采用了常规测井(自然伽马、自然电位、井径、中子、声波、密度、电阻率)和特殊测井(伽马能谱、地球化学、电成像、多极子阵列声波)的测井系列^[11~14]。在鄂尔多斯盆地陆相泥岩储层识别和评价中,利用自然伽马、密度、电阻率、中子、声波等测井曲线,根据岩—电对应关系,建立了测井数据岩性识别模板,开展了储层评价^[15]。柴页 1 井是中国地质调查局在西北侏罗系组织实施的第一口陆相页岩气参数井,完钻井深 2250m,钻探过程中见气测异常 65m,

油砂显示 16.5m。为全面获取陆相页岩气地层评价参数,借鉴其他地区的测井经验,实施了常规测井、元素俘获测井(ECS)、微电阻率扫描成像测井和声波扫描测井,结合岩心分析结果,获取了准确的地层参数,为后期压裂试气改造提供了依据。

1 概 况

柴页 1 井位于柴达木盆地北缘中段鱼卡—马海尕秀地区,区内发育九龙山、鱼卡本部、鱼卡北部、鱼卡西部、马海尕秀等背斜构造,已钻有 L1、L2、L6 等邻井(图 1)。

柴页 1 井自上而下钻遇古新统路乐河组(E_{1+2})、下白垩统犬牙沟组(K)、上侏罗统采石岭组(J_3)、中侏罗统大煤沟组(J_2)和基岩 5 套地层,中侏罗统大煤沟组为主要目的层(图 2)。根据岩屑录井资料分析,大煤沟组岩性主要为页岩、砂质泥岩、含砾细砂岩、泥岩、泥质粉砂岩等。其中,大煤沟组六段岩性为

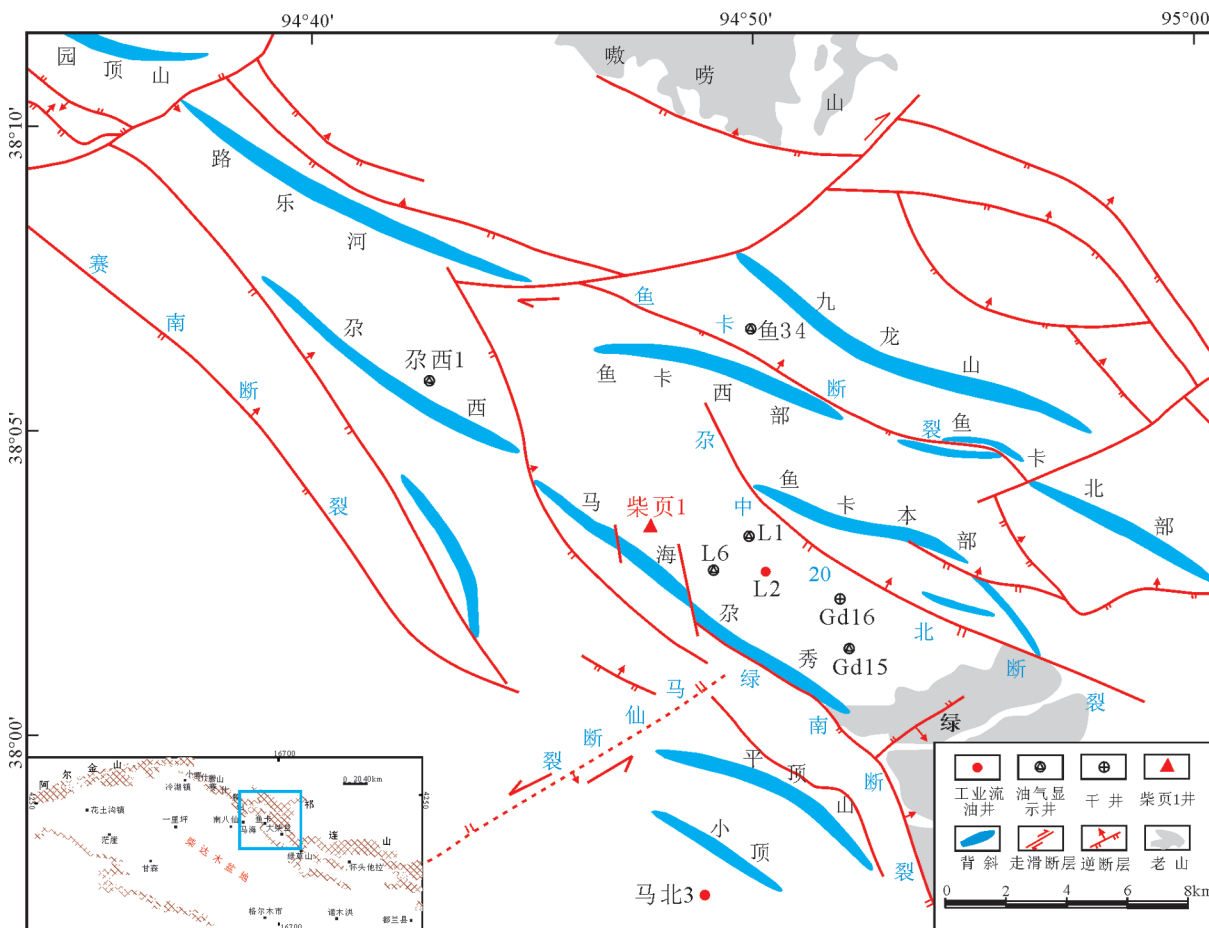


图 1 柴页 1 井区构造图

Fig. 1 Tectonic map of Chaiye1 well area

炭质页岩、煤层、含砾细砂岩、泥质粉砂岩等,为三角洲平原沉积;大煤沟组七段岩性以炭质页岩为主,部分层段发育薄层粉砂岩,为半深湖-滨浅湖沉积。

中国发育海相、海陆交互相和陆相3种类型页岩。四川盆地焦石坝页岩井下样品数据表明,下古生界海相有利页岩层段的脆性矿物含量高(平均59.1%),热演化程度高(镜质体反射率 R_o 值大于2.2%),压力系数高(1.55)^[16],砂岩夹层少,孔隙度较高。鄂尔多斯盆地上古生界海陆交互相有利页岩层段脆性矿物介于46.51%~50.04%之间^[17-18],压力系数介于0.83~0.95之间,为常压偏低地层,多见灰岩和煤系夹层,孔隙度较低^[19-20]。柴达木盆地北缘中侏罗统为陆相地层,井下样品和野外露头样品揭示,中侏罗统大煤沟组泥页岩地层的TOC介于1.00%~9.30%(平均6.45%)之间, R_o 介于0.45%~1.23%之间,处于低成熟-成熟的演化阶段,有机质类型以II型为主(图3),发育微孔隙和微裂缝,孔隙度介于2%~8%之间,平均3.7%^[21-22],利用液面高度折算鱼卡地区侏罗系压力系数为0.94。综合分析表明,柴达木盆地北缘陆相页岩层段具有岩性复杂(发育炭质页岩、煤层、砂岩夹层等)、成熟度低、压力系数低、孔隙度低等特点,对压裂改造和试气提出了挑战(表1)。

2 测井数据采集

根据地层评价的需要,利用ECLIPS-5700测井装备在柴页1井开展了自然伽马、自然伽马能谱、自然电位、补偿中子、岩性密度、正交偶极阵列声波、双侧向、阵列感应、六臂地层倾角等常规测井资料采集,由中国石油集团测井有限公司青海事业部完成。利用Max-Well测井装备开展了元素俘获测井、微电阻率扫描成像测井和声波扫描测井,由斯伦贝谢中国公司完成。

其中,利用常规测井识别有利储层,确定泥质含量,计算储层物性参数^[23],获取地层U、Th、K的含量,为储层定量评价提供数据;利用元素俘获测井计算地层粘土、碳酸盐岩、硅质、黄铁矿等矿物含量,结合常规测井曲线开展孔隙度、TOC评价^[24-25];利用电阻率成像测井获取储层裂缝发育程度和页理特征,判断井旁地应力的方向,识别和计算陆相页岩层段夹层及厚度;利用声波扫描测井,获得岩石机械应力参数(杨氏模量、泊松比),建立地层岩石力学模型,为页岩压裂作业和后续开发提供技术资料。



图2 柴页1井侏罗系地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of Chiaye1 well

3 储层评价结果

页岩气储层测井评价主要包括储层识别与划分、矿物成分确定、物性参数评价、含气性的确定、岩石力

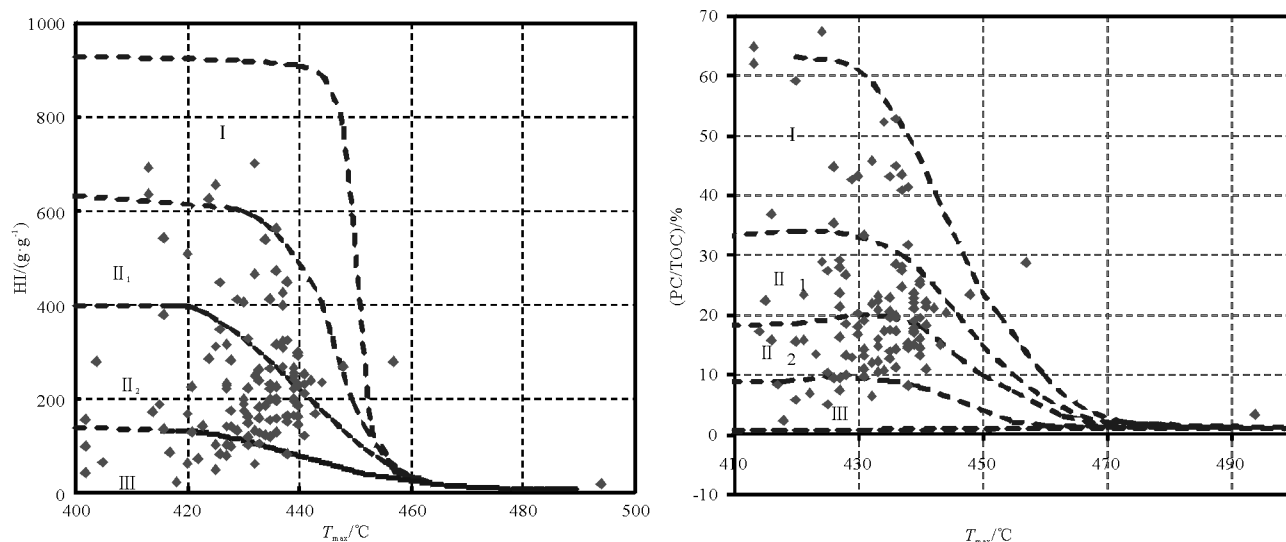


图 3 柴页 1 井中侏罗统大煤沟组页岩 T_{max} -HI 和 T_{max} -PC/TOC 划分类型图

Fig. 3 HI- T_{max} and PC/TOC- T_{max} partition type of shale in the Middle Jurassic Dameigou Formation

T_{max} —岩石热解最高峰温度;HI—烃源岩氢指数;PC/TOC—降解率

学参数计算等方面,莫修文等^[4]、王金彬等^[9]、郝建飞等^[24]对页岩气储层测井评价及进展进行了探讨。

3.1 有利储层

页岩气储层识别与划分一般利用“三高两低”的测井特征,即自然伽马高、电阻率高、补偿中子高、密度低、光电吸收界面指数低^[26]。参考这一特

征,结合气测异常、全烃较高、解析气含量较高的特点,在柴页 1 井中侏罗统大煤沟组划分了 3 套有利层段,由下至上分别为第 I 层组(2082.0~2120.0m)、第 II 层组(1992.4~2062.0m)和第 III 层组(1921.2~1979.3m)(图 4)。其中,第 I 层组 2088.0~2114.0m 富有机质页岩的自然伽马大于 130gAPI,密度介于

表 1 不同类型含气页岩储层综合对比

Table 1 Comprehensive correlation of different gas-bearing shale reservoirs

类别/地区	四川盆地东部	鄂尔多斯盆地	柴达木盆地北缘
目的层位	志留系龙马溪组—奥陶系五峰组	石炭系—二叠系本溪组、太原组、山西组	中侏罗统大煤沟组
地 储层深度/m	2500~3500	2400~3300	1950~2110
层 压力系数	1.55	0.83~0.95	0.94
特 沉积环境	海相	海陆交互相	陆相
征 地层温度/°C	99.4	86	55
夹层特征	少或无	夹较多砂岩、灰岩和煤层	夹较多砂岩和煤层
储 岩性	为灰黑色炭质笔石页岩	暗色泥页岩夹灰岩和煤层	黑色、灰黑色炭质泥岩为主,夹白色中砂岩和煤层
层 孔隙度	1.17%~8.61%,平均 4.9%	1.0%~4.0%	2.0%~8.0%,平均 3.7%
特 渗透率	0.002~335.2,平均 1.17	0.007~4.84,平均 0.89	多数样品小于 0.05mD
征 脆性矿物	37.2%~83.4%,平均 59.1%	46.51~54.04%	多介于 45%~70%
裂缝发育	不发育,多见水平层理	较少	有微裂缝
烃 有机质类型	I 型	I~III 型	II 型
源 TOC	0.55%~7.13%,平均 2.65%	1.00%~5.00%,平均 2.80%	1.00%~9.30%,平均 6.45%
岩 R_o	2.20%~2.58%,平均 2.48%	1.10%~2.50%	0.45%~1.23%

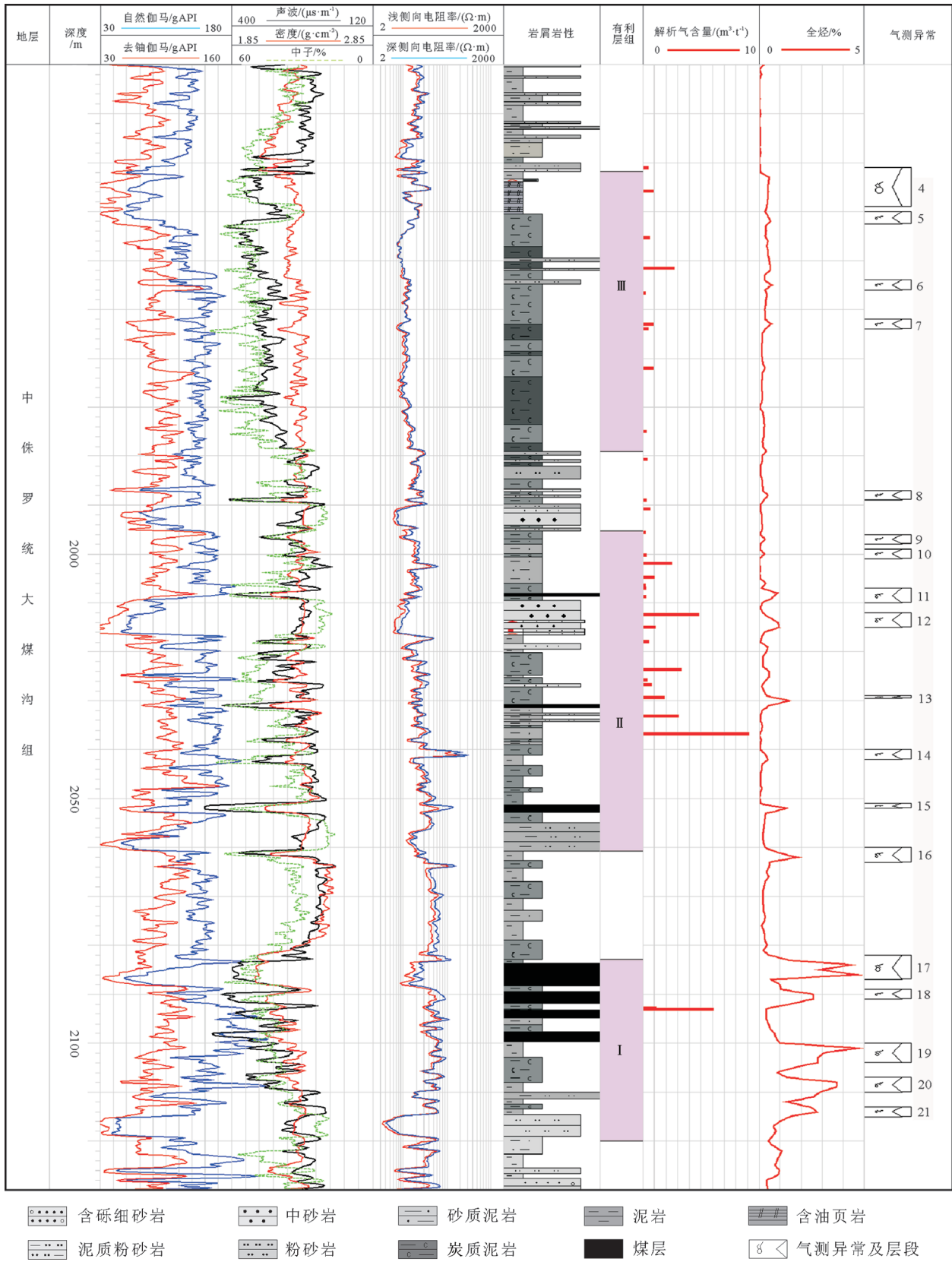


图4 柴页1井页岩气有利层段测井曲线划分

Fig. 4 Favorable intervals from logging curves in Chaiye1 well

2.16~2.37g/cm³之间,声波时差在 270~360 μs/m 之间,中子孔隙度在 36%~50%之间,深侧向电阻率在 30~100 Ω·m 之间。第 II 层组夹多层砂岩,2020~2051m 和 1995.0~2008.0m 富有机质页岩的自然伽马大于 130gAPI,密度介于 2.24~2.41g/cm³之间,声波时差在 220~320 μs/m 之间,中子孔隙度在 30%~50%之间,深侧向电阻率为 15~60 Ω·m。第 III 层组 1921.2~1979.3m 富有机质页岩的自然伽马大于 100gAPI,密度介于 2.23~2.39g/cm³之间,声波时差在 330~390 μs/m 之间,中子孔隙度在 39%~55%之间,深侧向电阻率为 7~20 Ω·m。3 个层组的富有机质页岩自然伽马值均大于 100gAPI,密度值范围变化较小,第 III 层组的

声波时差较大,电阻率比其他 2 个层组略低,影响了有利页岩储层品质,第 I 层组和第 II 层组的富有机质页岩储层显示高伽马、低密度、高声波时差、高中子、高电阻的特点,为更有利的页岩储层。

3.2 矿物成分

目前含气页岩层段矿物组成评价方法主要采用常规测井结合 ECS 或自然伽马能谱测井的方法^[26]。元素俘获测井所测量主要元素包括 Si、Ca、Fe、S、Ti、Gd 等,其中 Si 主要与石英关系密切,Ca 与方解石和白云石密切相关,利用 S 和 Ca 可以计算石膏的含量,Fe 与黄铁矿、菱铁矿等有关系,Al 与粘土(高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、海绿石等)含量密切相

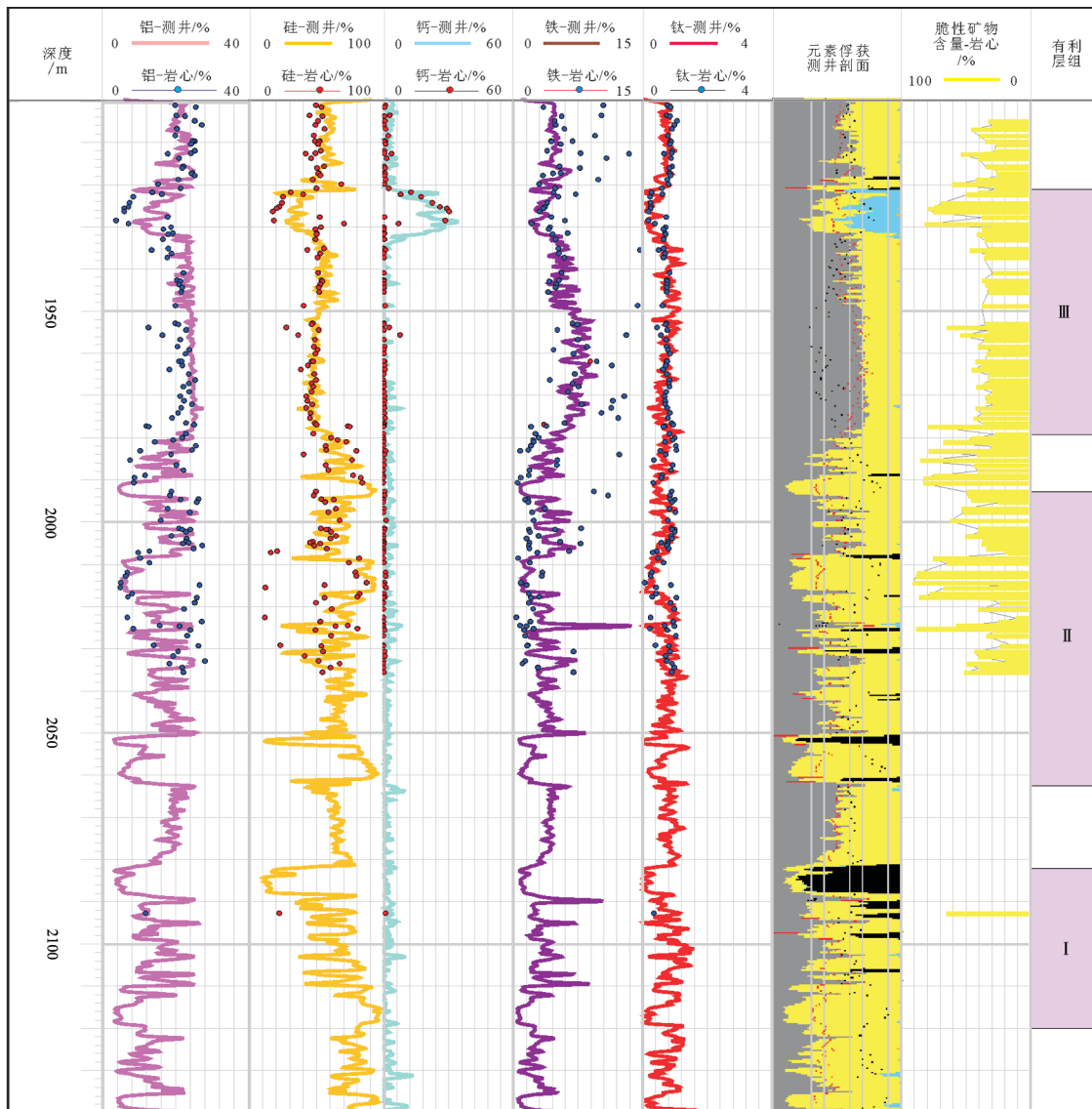


图5 柴页 1 井页岩气有利层段元素及矿物成分

Fig. 5 Element and mineral composition of favorable intervals in Chaiye 1 well

关。通过元素俘获测井,获取了柴页1井目的层段的粘土、硅质、钙质矿物含量等。

测井数据需要经过岩心数据标定才能获得准确的地层参数^[27],在核工业北京地质研究院分析测试研究所,利用AB-104L,AL-104,PW2404 X射线荧光光谱仪,测定了143块样品的Si、Al、Fe、Na、K、Ti等元素含量,与元素测井数据进行了对比标定。结果显示,两者之间具有较好的对应性(图5),说明元素测井解释结果可靠性较高。

根据ECS数据,第I层组2088.0~2114.0m富有机质页岩层段的脆性矿物含量(主要为石英、长石和方解石)介于45%~76%之间;第II层组2020~2051m和1995.0~2008.0m亦介于45%~76%之间;第III层组1921.2~1932.2m脆性矿物为60%~70%,钙质含量较高,岩心中可见顺层发育的方解石脉;1932.2~1979.3m脆性矿物含量约30%。国外学者认为,页岩气藏脆性矿物含量应大于40%,储层具有较低的膨胀能力才具有压裂改造的潜力^[1,28],对比分析3个层段,第I层组2088.0~2114.0m、第II层组2020~2051m和1995.0~2008.0m和第III层组1921.2~1932.2m层段具有较好的脆性矿物含量,有利于后期压裂改造。

3.3 物性

物性参数主要包括孔隙度和渗透率。孔隙度是计算游离气含量的重要参数之一。Michael等^[29]提出用ECS计算页岩气孔隙度;张晋言等^[30]研究发现,对密度孔隙度作类似于泥质校正的有机质校正以后的孔隙度接近于泥页岩的真实孔隙度,在实际应用中取得较好的效果;张作清等^[31]阐述了页岩气孔隙度的计算主要使用传统的三孔隙度测井和ECS元素测井;毛志强等^[32]提出结合声波市场和核磁共振测井资料计算低孔低渗气层真实孔隙度的方法;李军等^[33]提出了页岩气储层有机孔隙、粘土孔隙、碎屑孔隙、微裂缝四孔隙评价模型和测井定量计算方法。

本文采用常规测井结合ECS数据的方法进行孔隙度测井评价,其原理是将各种测井响应方程联立求解,计算各种矿物和流体的体积。通过调整各种输入参数,如矿物测井响应参数,输入曲线权值等,使方程矩阵的非相关性达到最小。可同时求解多个模型,按照一定的组合概率,组合得到最终模型,即地层岩石(或矿物)、流体体积,并运算得到储

层参数。测井输入曲线包括自然伽马、中子孔隙度、岩性密度、纵波时差、浅电阻率、深电阻率、ECS计算煤含量、碳酸盐含量、黄铁矿含量、Fe元素含量,每种矿物赋予特定的测井曲线(自然伽马、中子、密度、声波)骨架值,当利用ECS计算矿物含量干重计算后,在优化的多元联立求解的岩石物理模型中,可以同时求得地层的矿物体积含量和地层孔隙度。

利用岩心分析结果,对测井计算的孔隙度进行了标定,岩心分析的孔隙度和测井计算的孔隙度具有较好的一致性,验证了该方法的可行性(图6)。

第I层组优质页岩孔隙度为3%~10%(图7-a);第II层组优质页岩孔隙度在1%~12%均有分布,但以低孔隙度为主(图7-b);第III层组优质页岩孔隙

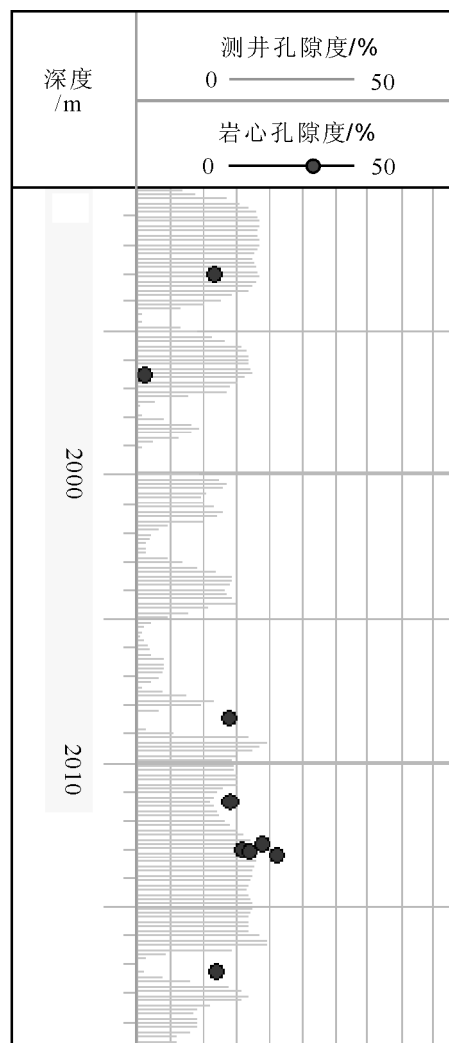


图6 柴页1井孔隙度计算成果

Fig. 6 Porosity result in Chaiye1 well

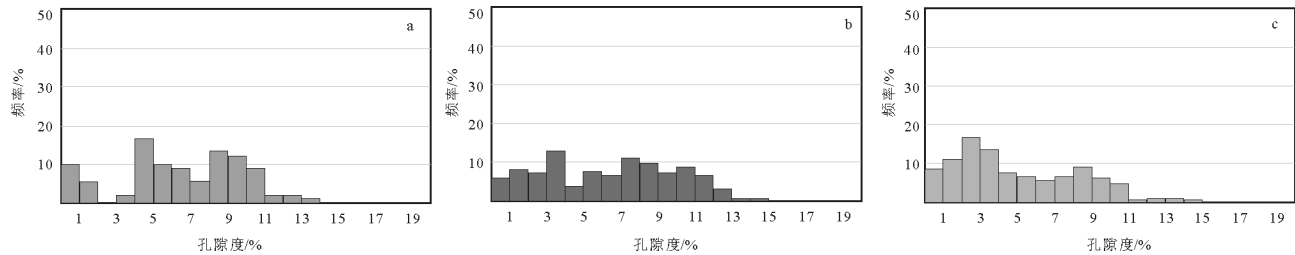


图7 柴页1井有利层段页岩孔隙度分布

Fig.7 Porosity of rich organic shale in favorable intervals of Chaiye 1 well

度介于0.5%~11%之间,以低孔隙度为主(图7-c)。

页岩储层的渗透率极低,常规的测井评价方法难以进行页岩储层渗透率的研究。在中国石油青海油田研究院非常规油气资源研究室,利用DX-07G型渗透率测定仪对13个泥页岩样品进行了测试分析,确定了泥页岩层段的渗透率(表2)。其中,9个样品的渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,13个样品中渗透率最高值仅为 $0.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与鄂尔多斯盆地长6和长8的致密砂岩气相比,长6地层的渗透率主要分布范围为 $0.5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,长8地层的渗透率主要分布范围为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[25-26],结果表明,柴页1井页岩储层具有极低渗透率的特点。

3.4 含气性

含气性主要是计算吸附气和游离气含量。吸附气含量是利用含气量与测井参数的关系建立模

型求取的,游离气含量是基于孔隙度、含气饱和度、密度、温度、压裂等多元参数,利用公式计算获取的。通过常规测井和ECS,确定页岩层段复杂矿物组分和地层有效孔隙度、地层含水饱和度,进而计算地层游离气体积,通过页岩的有机质含量、岩心实验得到有机质成熟度等参数计算地层的吸附气体积。

游离气是指在孔隙和裂缝中的天然气,计算方法与常规储层计算相似^[34],公式如下。

$$G_{\text{cm}} = (1/B_g) \times (\phi_{\text{eff}}(1-S_w)) \times (\psi / \rho_b) \quad (1)$$

其中 G_{cm} 为游离气含量; B_g 为地层气体体积系数; ϕ_{eff} 为有效孔隙度; S_w 为地层含水饱和度; ψ 为转换常数; ρ_b 为体积密度。

吸附气含气量是通过计算TOC确定的,当TOC较高时,吸附气含量与TOC呈正相关关系^[35-36]。

通过计算,获取了柴页1井三段优质页岩的总有机碳含量和总含气量,并与岩心数据进行了对比,两者具有较好的匹配关系(图8)。其中第I层组富有机质页岩TOC和含气量分别为4.2%和 $4.5\text{m}^3/\text{t}$;第II层组富有机质页岩TOC和含气量分别为3.5%和 $3.0\text{m}^3/\text{t}$,第III层组富有机质页岩TOC和含气量分别为3.2%和 $1.5\text{m}^3/\text{t}$ 。第I层组和第II层组的富有机质页岩TOC和含气量均优于第III层组(图9)。

3.5 可压裂性

页岩具有低孔隙度、低渗透率的特点,若要获得较高的产量,需采用水力压裂对储层进行改造,提高储层的渗透率,而储层岩石力学评价为储层压裂改造提供了依据^[37]。笔者通过常规测井及声波扫描资料,提取地层的纵波时差和横波时差,结合密度测井得到体积密度,计算分析了柴页1井中侏罗统大煤沟组地层剪切模量、体积模量、杨氏模量、泊松比等岩石力学参数(图10)。

表2 柴页1井部分样品渗透率分析结果

Table.2 Permeability of shale in Chaiye1 well

序号	深度/m	空气渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	岩石密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	1932.84	<0.05	2.904
2	1933.79	0.032	3.083
3	1935.69	<0.05	3.066
4	1936.69	<0.05	3.047
5	1940.14	<0.05	2.970
6	1942.69	<0.05	3.334
7	1943.49	<0.05	3.214
8	1944.6	<0.05	2.790
9	1950.5	<0.05	3.027
10	1958.8	0.22	3.135
11	1989.7	0.56	2.648
12	1996.6	<0.05	2.602
13	2030.93	0.0047	3.34

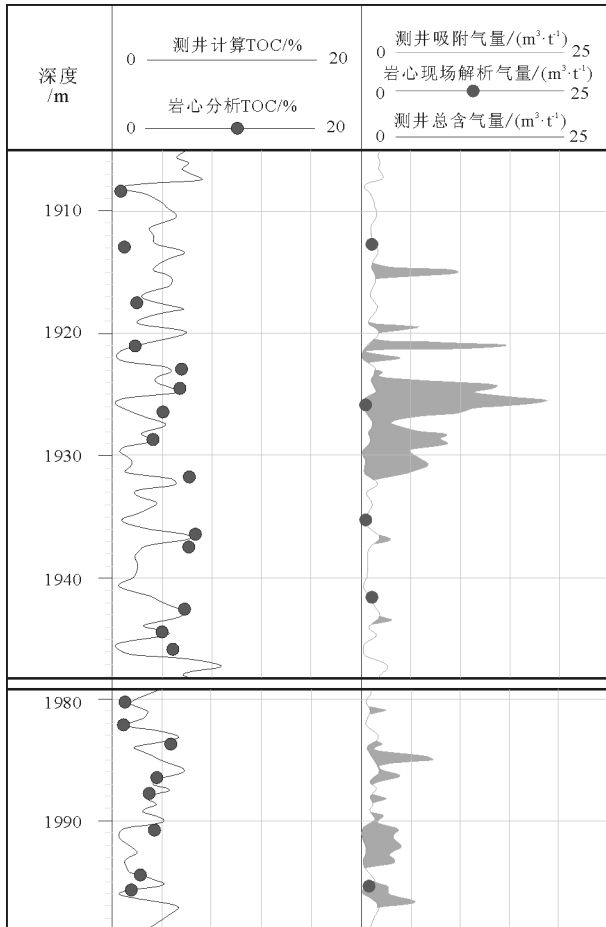


图8 柴页1井测井计算含气量与现场解吸含气量对比

Fig. 8 Gas content from logging evaluation and desorption measurement of Chaiye 1 well

结果显示,第Ⅰ层组储层段的最小水平主应力为32~33MPa,杨氏模量介于8.7~14.9GPa之间,泊松比为0.28~0.36,遮挡条件差,两向应力差大,易沟通煤层和其他层,储层改造难度大。第Ⅱ层组射孔层段最小主应力为30~40MPa,明显分为上部2021~2028m和下部2028~2039m层段。两端杨氏模量介于9~30GPa之间,泊松比介于0.21~0.35之间,整个目的层段应力隔层不明显,遮挡条件较差,两向应力差较大,在10MPa左右,改造过程中需控制压裂规模。第Ⅲ层组杨氏模量介于5.1~9.1GPa之间,泊松比为0.31~0.36,1925~1980m应力差较小,同属一套应力区域。上隔层1900.0~1918.0m为泥页岩,隔层遮挡条件较好;下隔层1931.9~1979m为灰色炭质泥岩,粘土含量较高,但是应力差较小,遮挡条件较差。

4 讨论

4.1 TOC计算方法适用性分析

TOC是页岩储层品质评价的重要参数,在正常的有机质成熟度范围内,地层中TOC越高其吸附能力越强,TOC的高低对富有机质页岩的含气量起决定性的作用。目前计算TOC的方法包括利用自然伽马能谱和岩心资料^[38]、密度曲线和岩心资料^[39]、基于电阻率和孔隙度测井的 $\Delta \log R$ 方法^[36],以及通过ECS结合常规测井曲线进行计算等方法^[40]。柴页1井部分层段发育钙质含量较高的富有机质页岩和煤层,自然伽马值较低,因此难以用自然伽马能谱和岩心建立关系求取TOC;目的层段夹层发育,地层中矿物成分复杂,对密度曲线产生影响,且页岩地层电阻率受粘土矿物含量、黄铁矿及地层流体影响,部分层段电阻率偏低,仅用密度曲线或 $\Delta \log R$ 方法很难准确计算TOC。陆相页岩层段岩性、矿物成分和流体性质的复杂性决定了很难用单一的方法准确求取TOC,而利用ECS结合常规测井曲线的方法,可准确获取地层矿物含量、岩石密度和干酪根含量,利用干酪根含量转换为TOC,经过与岩心分析结果比对,表明该方法能够较准确地求取地层中的TOC。

4.2 含气量计算结果的可靠性分析

通过测井资料综合解释确定富有机质页岩含气量,已经在北美页岩气勘探开发中普遍应用^[41-42]。通常吸附气含量是在总有机碳含量计算的基础上进行的,还需等温吸附实验提供校正参数^[43],目前该区此类实验数据较少,且实验时间较短,对吸附气含量会产生一定的影响。游离气含量是在页岩地层有效孔隙度和含水饱和度的基础上开展的,目前研究区尚未开展岩电实验,应用考虑电阻率因素的西

$$\text{门杜公式}^{[44]} \left(S_w = \frac{aR_w}{2\Phi^m} \times n \sqrt{\frac{4\Phi_c^m}{aR_w R_t} + \left(\frac{V_{sh}}{R_{sh}}\right)^2} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right),$$

计算了柴页1井含气饱和度。总含气量为上述两者之和,将测井计算的含气量与现场解吸获取的含气量进行比对,两者具有较好的相关性,说明利用该方法计算页岩储层含气量可获得较为可靠的数据。1923~1930m碳酸盐含量较高,因此电阻率较高,测井计算的含气饱和度偏高,游离气含量值偏高;1991~1994m为砂岩储层,解释为水层,但电阻率达到 $8.0 \Omega \cdot m$,计算的含气饱和度偏高,因此

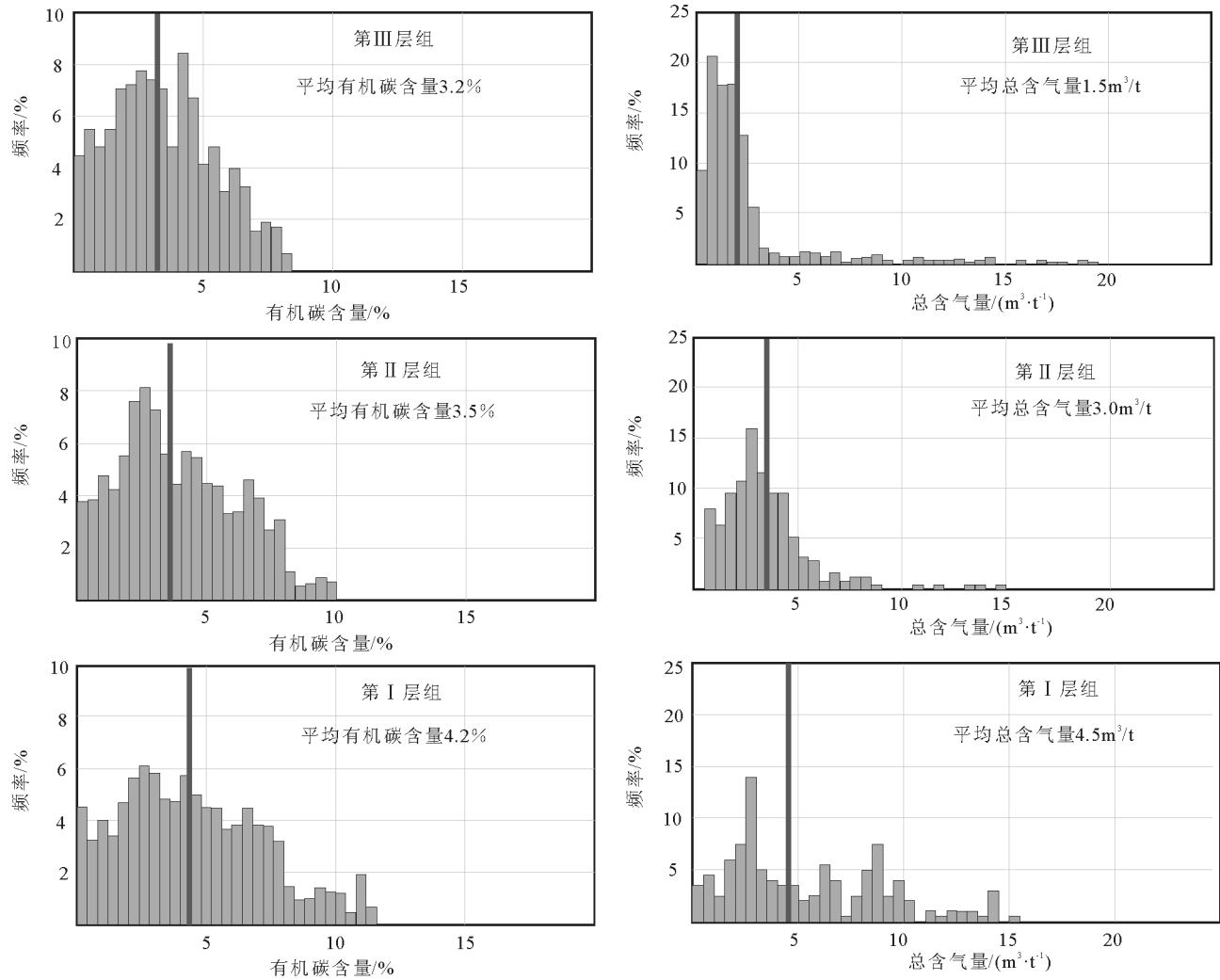


图 9 柴页 1 井页岩气层段 TOC 和含气量分析统计

Fig. 9 Statistical diagram of total organic carbon content and gas content in Chaiye1 well

游离气含量值偏高。非常规油气藏的含油气饱和度计算一直是难点,因此游离气含量的计算精度受此影响。柴页 1 井现场解析气和计算的吸附气含量比较吻合,游离气的计算结果受电阻率影响较大,在今后的研究中还需进一步改善。

4.3 孔隙度计算方法评价

页岩气孔隙度的计算方法基于常规测井曲线开展,而常规测井曲线受页岩矿物组分、流体性质的影响表现出不同的响应特征,对准确获取地层孔隙度带来一定困难。核磁共振测井不受岩石本身矿物的影响,可以直接获取地层物性参数,减少了常规测井曲线计算孔隙度的不确定性。贝克休斯

公司在岩性组成复杂、储层非均质性程度高的 Barnett 页岩中利用核磁共振测井计算孔隙度,计算结果为 4%~6%,与岩心分析孔隙度数据一致^[8]。因此,在今后的测井采集系列选择中,可以选择加测核磁共振测井项目,直接获取储层物性参数。另外,国外学者把岩心粉碎到一定颗粒后测量页岩的孔隙度,该方法获得了美国天然气研究院(GRI)的认可,其测量值比利用常规氦气测量获得的数值偏高^[45]。在今后的研究过程中,需要进一步评价该岩心分析方法的适用性,依据最新的岩心孔隙度分析结果,不断调整和完善利用测井曲线计算孔隙度的方法,为储层划分、确定射孔井段位置等提供依据。

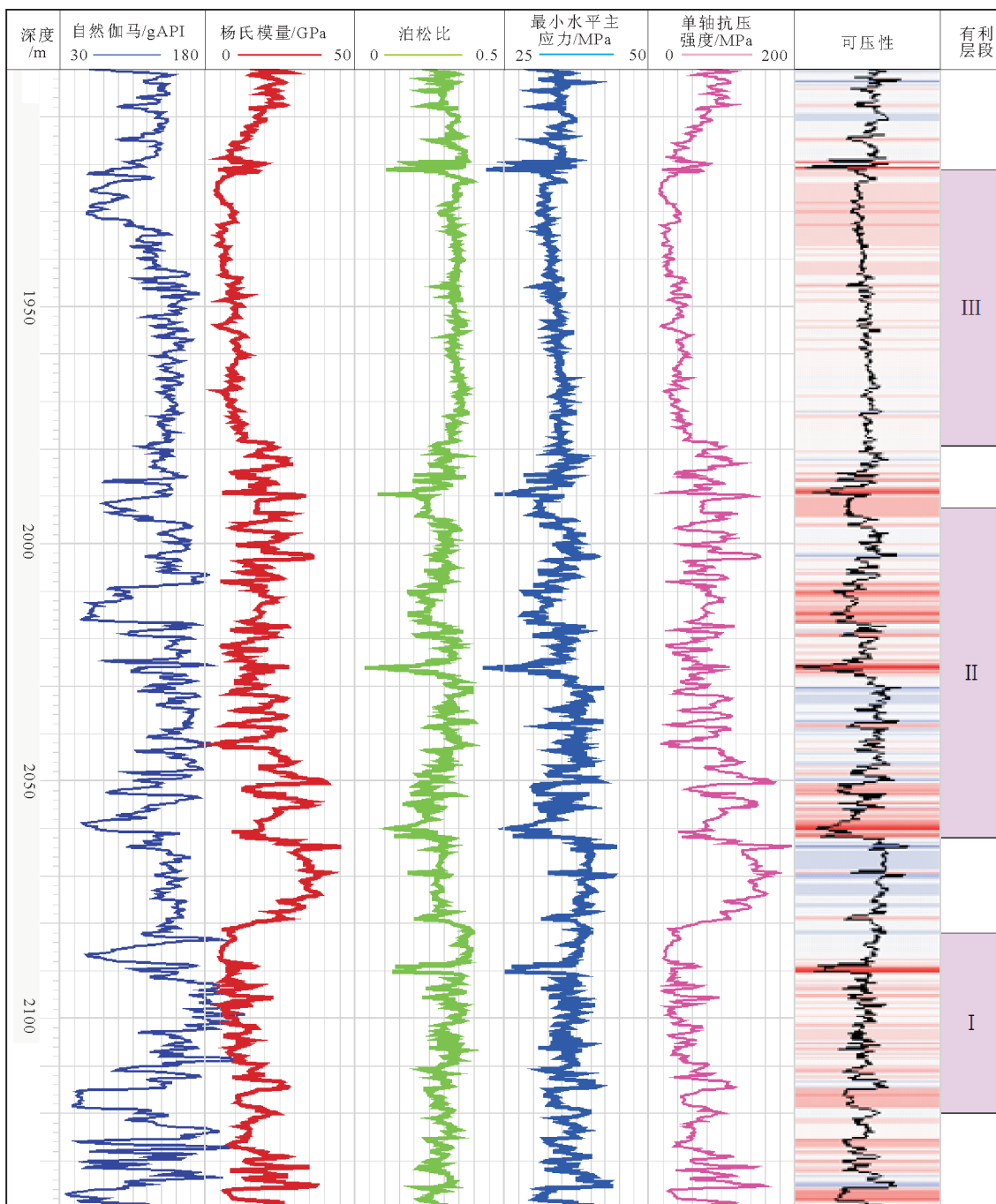


图10 利用测井资料计算得到的岩石力学参数

Fig. 10 Geomechanical parameters from well-logging data

5 结论

(1) 柴页1井的中侏罗统发育多种岩性,不同岩性的总有机碳含量不同,有利层段页岩总有机碳含量在3.20%~4.20%之间,大于陆相页岩气核心区优选参考标准TOC平均不小于2.0%的下限,为较好的有利区。

(2) 柴页1井测井获取的页岩层段总含气量大于陆相页岩气核心区优选参考标准总含气量不小于 $1.0\text{m}^3/\text{t}$ 的下限,具有进一步勘探开发的潜力。

(3) 测井储层评价显示,第I层组和第II层组为更有利的页岩储层,杨氏模量高、泊松比低,但压力系数低,夹层发育,夹层中流体性质复杂,因

此在储层改造过程中应优选压裂工艺,精确确定射孔层段,控制压裂规模,获取页岩层段产能。

致谢:成文过程中得到中国地质调查局油气资源调查中心翟刚毅教授级高工、中国地质调查局总工程师室任收麦研究员的指导,数据处理解释过程中得到斯伦贝谢中国公司吴丽艳博士的帮助,在此深表感谢。

参考文献

- [1]Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluation and producing shale gas resources[C]//SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010: 1-29.
- [2]Hurst A. Mineralogical analysis and the evaluation of the petrophysical parameter V_{shale} for reservoir description[J]. Marine and Petroleum geology, 1987, 4(14):82-91.
- [3]李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [4]莫修文, 李舟波, 潘保芝. 页岩气测井地层评价的方法与进展[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 400-405.
- [5]Hameed A, Bacclarelli M. Unconventional reservoir formation evaluation challenges addressed with deployment-optimized open hole logging solutions[C]//SPE Eastern Regional Meeting, USA, 2014: 1-11.
- [6]Wang G C, Carr T R. Methodology of organic-rich lithofacies identification and prediction: A case study from Marcellus shale in the Appalachian basin[J]. Computer & Geosciences, 2014, 49:151-163.
- [7]Parker M, Buller D, Petre E, et al. Haynesville shale-petrophysical evaluation[C]//SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Denver, Colorado, USA, 2009:1-11.
- [8]Jacobi D, Gladikh M, LeCompte B, et al. Integrated petrophysical evaluation of shale gas reservoirs[C]//CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2008: 1-23.
- [9]王金彬, 李庆华, 白松涛. 页岩气储层测井评价及进展[J]. 测井技术, 2012, 36(5): 441-447.
- [10]董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1-15.
- [11]严伟, 王建波, 刘帅, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组泥页岩储层测井识别[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 30-35.
- [12]齐宝权, 杨小兵, 张数东, 等. 应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 44-47.
- [13]吴庆红, 李晓波, 刘洪林, 等. 页岩气测井解释和岩心测试技术[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 484-488.
- [14]谢庆明, 程礼军, 刘俊峰, 等. 渝东南黔江地区龙马溪组页岩气储层测井解释评价研究[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1312-1318.
- [15]王香增. 陆相页岩气[M]. 北京:石油工业出版社, 2014:63-73.
- [16]郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1):28-36.
- [17]王社教, 李等华, 李建忠, 等. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力评价[J]. 天然气工业, 2011, 31(12):40-46.
- [18]郭少斌, 王义刚. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(3):445-452.
- [19]王晓梅, 赵靖舟, 刘新社. 鄂尔多斯盆地东部上古生界现今地层压力分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5):646-651.
- [20]Xiao X M, Zhao B Q, Thu Z L, et al. Upper Paleozoic petroleum system, Ordos basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(8): 945-963.
- [21]付小东, 邱楠生, 饶丹. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩油气成藏条件地质地球化学分析[J]. 地球化学, 2014, 43(5): 437-452.
- [22]邵龙义, 李猛, 李永红. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2014, 21(4):312-322.
- [23]刘双莲, 陆黄生. 页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨[J]. 测井技术, 2011, 35(2): 112-116.
- [24]郝建飞, 周灿灿, 李霞, 等. 页岩气地球物理测井评价综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1634-1632.
- [25]Jacobi D, Breig J, LeCompte B, et al. Effective geochemical and geomechanical characterization of shale gas reservoirs from the well-bore environment: Caney and the Woodford shale [C]//SPE Annual Technical Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2009: 1-20.
- [26]Alexander T, Baihly J, Boyer C, et al. Shale gas revolution[J]. Oil-field Review, 2011, 23(3):40-55.
- [27]Clarkson C R, Jensen J L, Chipperfield S. Unconventional gas reservoir evaluation: what do we have to consider[J]. Journal of natural gas and engineering, 2012, 8: 9-33.
- [28]Britt L K, Schoeffler J. The Geomechanics of a shale play: what makes a shale prospective[C]//SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, West Virginia, USA, 2009:1-9.
- [29]Herron M M, Herron L S, James A, et al. Real-time Petrophysical analysis in siliciclastics from the integration of spectroscopy and triple-combo logging[C]//SPE Annual Technical Conference, San Antonio, Texas, USA, 2002:1-10.
- [30]张晋言, 孙建孟. 利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J]. 测井技术, 2012, 36(2):146-153.
- [31]张作清, 郑场, 孙建孟. 页岩气评价“六性关系”研究[J]. 油气井测试, 2013, 22(1):65-78.
- [32]毛志强, 张冲, 肖亮. 一种基于核磁共振测井计算低孔低渗气层孔隙度的新方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1):105-109.

- [33]李军,路菁,李争,等.页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J].石油与天然气地质,2014,35(2):266-271.
- [34]Zhou Q, Xiao X M, Tian H, et al. Modeling free gas content of the lower Paleozoic shales in the Weiyuan area of the Sichuan basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 56: 87-96.
- [35]Quirein J, Galford J, Witkowsky J. Formation evaluation and characterization of shale-gas reservoirs by means of core and wireline data integration[J]. The Leading Edge, 2013, Special section:1486-1491.
- [36]Passey Q R, Creansy S, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990,74(12):1777-1794.
- [37]Labani M M, Rezaee R. The important of geochemical parameter and shale composition on rock mechanical properties of gas shale reservoir: a case study from the Kockatea shale and Carynginia formation from the Perth basin, western Australia[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48:1249-1257.
- [38]Fertle H. Total organic carbon content determined from well logs[J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(2): 407-419.
- [39]Schmoker J W, Hester T C. Organic carbon in Bakken formation, United states portion of Williston basin[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67 (2): 2165-2174.
- [40]Lewis R, Ingraham D, Percy M. New evaluation techniques for shale gas reservoirs[C]//Reservoir Symposium, Oklahoma City, USA,2004:1-15.
- [41]Decker A D, Hill D G, Wicks D E. Log-based gas content and resource estimates for the Antrim shale, Michigan basin[C]//SPE Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Co, USA, 1993: 659-669.
- [42]Yu W, Patzek T W. Evaluation of gas adsorption in Marcellus shale[C]//SPE Annual Technical Conference, Amsterdam, the Netherlands, 2014:1-15.
- [43]Sarmiento M F R, Ducros M, Carpentier B, et al. Quantitative evaluation of TOC, organic porosity and gas retention distribution in a gas shale play using petroleum system modeling: application to the Mississippian Barnett shale[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013,45: 315-330.
- [44]Chisholm J L, Schenewerk P A, Donaldson E C, et al. A comparison of shaly-sand interpretation techniques in the Mesaverde group of the Uinta basin, Utah[J]. SPE Formation Evaluation 1987, 2(4): 478-486.
- [45]Spears R W, Dudus D, Foulds A, et al. Shale gas core analysis: strategies for normalizing between laboratories and a clear need for standard materials[C]//SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, Colorado, USA, 2011:1-10.