

页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法

李军¹,路菁¹,李争²,武清钊¹,南泽宇¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北潜江 433124)

摘要:页岩气储层微观孔隙组分复杂,分为有机孔隙、碎屑孔隙、粘土孔隙和微裂缝。在岩心和测井响应特征分析基础上,提出利用测井资料定量评价页岩储层总孔隙及其微观孔隙组分的方法:①基于体积模型,利用密度测井资料或声波测井资料确定页岩储层总孔隙度;②综合利用常规测井资料和自然伽马能谱测井资料确定有机质体积含量,依据扫描电镜(SEM)技术确定刻度系数,得到有机孔隙度计算方法;③粘土孔隙是束缚水主要赋存空间,利用测井资料逐点确定粘土含量,并与邻近泥岩相关联,得到粘土孔隙度计算方法;④基于微裂缝的双侧向测井响应特征,通过正反演数值模拟计算,得到微裂缝计算方法;⑤总孔隙度与有机孔隙、粘土孔隙和微裂缝之差即为碎屑孔隙度。岩心结果表明,采用上述方法计算各微观孔隙组分与岩心测试结果吻合,表明方法的正确性。

关键词:四孔隙模型;测井;定量评价;页岩气;储层评价

中图分类号:TE122

文献标识码:A

‘Four-pore’ modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir

Li Jun¹, Lu Jing¹, Li Zheng², Wu Qingzhao¹, Nan Zeyu¹

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Exploration & Development Research Institute, Jianghan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China)

Abstract: The micropores of the shale gas reservoir consist of organic pore, clastic pore, clay pore and micro-fracture. After a comprehensive analysis of core properties and the logging response characteristics, several new methods are proposed to evaluate total porosity and porosity of each micropore type of shale gas reservoir quantitatively. 1) Based on the volume model, the DEN or DT is used to determine the total porosity of shale gas reservoir. 2) Conventional logs and SGR (Natural Gamma Ray Spectroscopy) logs are utilized to determine the volume-percent of organic matter content of shale gas reservoir, a scale parameter is determined by SEM technique, and finally a method for calculating the organic porosity is set up. 3) Considering the clay pore is the main storage space for bound water, clay content is obtained from logs and correlated with the adjoining shale to get the evaluation method of clay porosity. 4) Based on the response characteristics of dual laterolog for micro-fracture, an evaluation method of micro-fracture porosity is proposed by forward and inverse numerical simulation computations. 5) The clastic porosity can be determined by subtracting organic porosity, clay porosity and micro-fracture porosity from the total porosity. A good agreement is found between the core analysis and the micropore porosity computed by using the above methods, which indicates the validity of the methods proposed in this paper.

Key words: ‘four-pore’ model, wireline log, quantitative evaluation, shale gas, reservoir evaluation

目前,页岩气储层测井评价取得一定进展。在岩心刻度测井条件下,能够利用测井资料定量评价岩性组分、有机质含量、总孔隙度、含气性和岩石力学性质等参数^[1-4]。其中,地层岩性组分、有机质含量、总孔隙度评价方法相对成熟,评价精度较高^[5-6]。借用煤层气评价方法中朗格缪尔方程来评价页岩吸附气含量,而游离气含量则采用砂泥岩含油气饱和度测井模型,如斯伦贝谢公司采用西门杜公式确定含油气饱和度,进而确定页岩游离气含量。由于页岩气储层孔隙结构和导电机理复杂,导致游离气评价模型适应性差,

评价精度较低。基于测井对页岩总孔隙中各微观孔隙组分进行定量评价,目前尚无文献报道。通过系统岩心测试,提出页岩气储层有机孔隙、粘土孔隙、碎屑孔隙和微裂缝等“四孔隙”评价模型和测井定量计算方法,在此基础上估算游离气含量,并对实际测井资料进行处理和评价。

1 “四孔隙”模型建立

页岩气储层储集空间类型多,从成因来说,页岩孔

孔隙类型分为有机孔隙和无机孔隙。有机孔隙发育于成熟—高成熟有机质中,是有机质热演化生烃膨胀作用的结果^[7-10]。无机孔隙包括粘土孔隙、粉砂质等碎屑粒间及粒内孔隙、微裂缝孔隙。各微观孔隙组分形状和空间尺度不相同。依据微观孔隙组分测井响应差异,建立“四孔隙”模型:将总孔隙分为有机孔隙、粘土孔隙、碎屑孔隙和微裂缝,骨架分为有机骨架和无机骨架(图1a)。图1b展示页岩储层扫描电镜(SEM)测试结果,显示有机孔隙和各种无机孔隙及空间尺度分布。有机孔隙呈圆形、椭圆形及不规则管形,空间尺度以纳米级别为主;粘土孔隙呈片状、不规则状,空间尺度为纳米—微米级;碎屑孔隙(粒间、粒内)形状不规则,以纳米—微米级为主;微裂缝尺度较大,为微米—毫米级。

图2为高精度核磁共振实验,也显示多重微观孔隙分布特征。表1展示核磁共振实验孔隙组分布情况,基质孔隙(中孔、微孔)占80%以上,大孔和微裂缝占20%以下。

基于“四孔隙”模型,利用测井资料确定总孔隙度、有机孔隙度、粘土孔隙度、碎屑孔隙度和裂缝孔隙度,为精细评价页岩气储层奠定基础。

2 测井定量计算方法

2.1 总孔隙度测井计算

由于页岩气储层超低孔渗特征,造成实验测定孔隙度、渗透率等物性参数困难,目前国内外尚无测定页岩

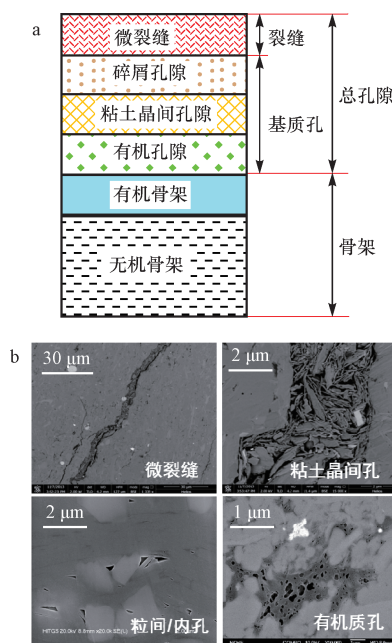


图1 页岩气储层“四孔隙”模型建立

Fig.1 'Four-pore' modeling of shale gas reservoir

a. “四孔隙”体积模型;b. 扫描电镜孔隙类型分析

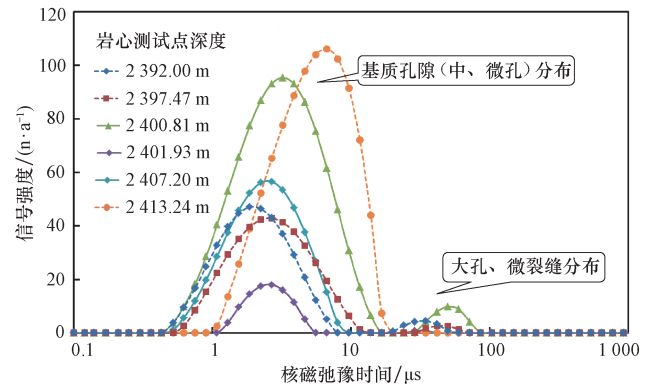


图2 页岩储层多重孔隙分布

Fig.2 Distribution of multiple micropores of shale gas reservoir

岩孔隙度、渗透率物性参数的标准方法和步骤,各商业实验室由于采用方法和步骤不同,即使对同一样品进行测量,测量结果也有很大差异^[11]。

页岩储层总孔隙包括有效孔隙(自由流体孔隙)和束缚孔隙(束缚水孔隙)。影响总孔隙度测定结果的关键因素包括:①束缚水和残余油气;②测量气体介质(氦气、氮气等)的分子大小;③泥岩吸附作用;④样品预处理方法及质量损失;⑤围压、孔隙压力^[6]。由于这些因素影响,造成测量结果差异。氦气分子具有较小动力半径(表2),常作为测量气体介质,依据气体平衡方程确定页岩总孔隙度。

2.1.1 基于体积模型法确定总孔隙度

测井地层评价中,经常采用干粘土、湿粘土和泥质三种物质的骨架参数确定总孔隙度和有效孔隙度。干粘土只包括粘土矿物及晶间水,湿粘土则包含干粘土和束缚水(毛管束缚水和薄膜束缚水),泥质则包括湿粘土和少量粉砂质。这三种物质都有自己的骨架参数,包括骨架密度、骨架声波时差和骨架中子值。利用干粘土骨架参数确定总孔隙度,而利用湿粘土和泥质骨架参数确定有效孔隙度。依据体积模型,密度测井响应方程如下:

$$\rho_b = \Phi \rho_{fm} + \rho_{org} TOC_v + (1 - TOC_v - \Phi) \rho_m \quad (1)$$

式中: ρ_b 、 ρ_m 、 ρ_{fm} 和 ρ_{org} 分别为测井、干粘土骨架、孔隙中混合流体和有机质密度, g/cm^3 ; Φ 为总孔隙度,%; TOC_v 为有机碳含量(体积比),%。 TOC_v 与 TOC_w (质量比)转换关系为:

$$TOC_v = TOC_w \frac{\rho_b}{\rho_{org}} \quad (2)$$

联立(1)和(2)式得到:

$$\Phi_t = \frac{1 - \frac{\rho_b}{\rho_m} \left(1 - TOC_w + \frac{\rho_m}{\rho_{org}} TOC_w \right)}{1 - \frac{\rho_{fm}}{\rho_m}} \quad (3)$$

表 1 页岩岩心核磁共振孔隙度
Table 1 NMR porosity analysis of shale gas cores

样品编号	总孔隙度/%	基质孔隙度/%	基质孔隙度与总孔隙比/%	大孔、微裂缝孔隙度/%	大孔、微裂缝孔隙度与总孔隙比/%	岩样描述
67	4.71	4.54	96.4	0.17	3.6	灰黑色炭质泥岩
68	4.03	3.96	98.3	0.07	1.7	灰黑色炭质泥岩
69	5.24	4.93	94.1	0.31	5.9	灰黑色炭质泥岩
70	3.78	3.59	95.0	0.19	5.0	灰黑色炭质泥岩
71	4.47	4.09	91.5	0.38	8.5	灰黑色炭质泥岩
72	4.10	3.95	96.3	0.15	3.7	灰黑色炭质泥岩
73	4.79	4.49	93.7	0.30	6.3	灰黑色炭质泥岩
74	4.46	4.11	92.2	0.35	7.8	灰黑色炭质泥岩
75	4.21	3.98	94.5	0.23	5.5	灰黑色炭质泥岩
76	5.60	4.45	79.5	1.15	20.5	灰黑色炭质泥岩
77	5.10	4.53	88.8	0.57	11.2	灰黑色炭质泥岩
78	3.50	2.91	83.1	0.59	16.9	灰黑色炭质泥岩
79	4.84	4.63	95.7	0.21	4.3	灰黑色炭质泥岩
80	6.25	6.07	97.1	0.18	2.9	灰黑色炭质泥岩

表 2 几种常见物质分子直径

分子	甲烷	二氧化碳	水	水银	氧气	氮气	氦气
直径/nm	0.380	0.323	0.324	0.314	0.292	0.315	0.265

孔隙中混合流体密度 ρ_{fm} 由下式得到:

$$\rho_{fm} = \rho_{hy} + (\rho_w - \rho_{hy})S_{wb} \tag{4}$$

式中: ρ_{hy} 和 ρ_w 分别为油气和水的密度, g/cm^3 ; S_{wb} 为含水饱和度, %。

2.1.2 岩心刻度测井法确定总孔隙度

依据岩心刻度测井方法,建立经验公式,确定页岩总孔隙度。在页岩气储层孔隙度测井系列中,密度测井受井眼影响大,中子测井受粘土晶间水影响大。声波时差测井受井眼影响较小,能够较好地反映页岩储层总孔隙度。涪陵地区页岩岩心氦气测量总孔隙度与测井声波时差呈现高度正相关关系,相关系数达到 0.75 以上。其关系式如下:

$$\Phi_i = 0.062DT - 10.959 \tag{5}$$

式中: DT 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

2.2 有机孔隙度测井计算

有机孔隙发育于成熟-高成熟有机质中,有机孔隙度确定首先要确定有机质含量。有机质含量有两种表示方法,一种是质量百分比,常用于实验室分析;另一种是体积百分比,常用于测井评价中。

2.2.1 有机质含量(TOC)计算

有机质由于密度低、声波传播速度低、含氢指数高以及不导电等特性,造成鲜明的测井响应特征,同时富有机质页岩还表现为高自然伽马特征,在自然伽马能谱测井响应上表现为高铀含量特征。可以利用这些测井特征定量计算 TOC。常用测井计算 TOC 方法^[12-15]如下(表 3):

表 3 TOC 测井评价方法

方法	方法描述
体积密度法	利用岩心刻度密度测井(DEN),建立 TOC 经验公式
自然伽马法	利用岩心刻度自然伽马(GR),建立 TOC 经验公式
自然伽马能谱法	利用自然伽马能谱测井中 U 含量曲线,建立 TOC 与 U 含量经验关系
自然伽马-密度法	依据岩心分析资料,建立 TOC 与密度、自然伽马多参数关系
$\Delta\text{Log } R$ 法	声波时差与电阻率重叠确定 TOC
脉冲中子伽马能谱法	利用脉冲中子伽马能谱测井新方法,直接测量地层 C 和 O 等元素,确定 TOC

涪陵地区页岩 TOC 与测井密度之间呈现强负相关关系,相关系数达到 0.9 以上。

$$TOC = -14.3157DEN + 39.6302 \tag{6}$$

式中: DEN 为体积密度, g/cm^3 。

2.2.2 有机孔隙度计算

利用 SEM 测试技术可以直观地确定有机孔隙大小及其分布,估算有机孔隙面孔率。利用平均面孔率对测井计算的 TOC_v (体积比)进行刻度,获得确定有机孔隙度(Φ_{org})关系式。

$$\Phi_{org} = aTOC_w \frac{\rho_b}{\rho_{org}} \tag{7}$$

式中: a 为刻度系数,与有机质成熟度有关,由 SEM 分析确定。

2.3 粘土孔隙度计算

粘土孔隙是粘土矿物之间的微细孔隙,是束缚水的主要赋存空间^[16]。从成因上看,粘土束缚水分为粘土矿物表面的薄膜束缚水和微小孔隙中的毛管束缚

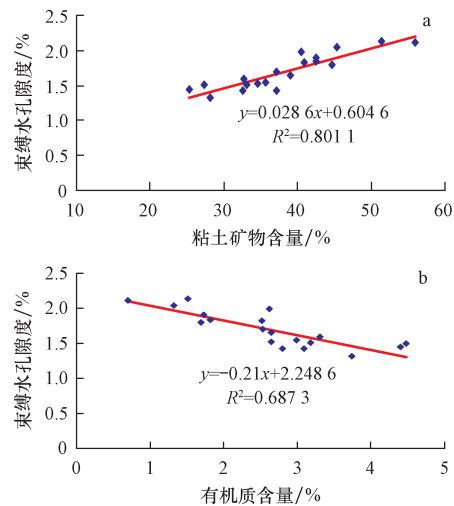


图 3 页岩气储层束缚水孔隙度与粘土矿物含量及有机质含量关系

Fig. 3 Scatter diagram of bound water porosity vs. clay mineral content/TOC for shale gas reservoir

a. 束缚水含量与粘土矿物含量关系;

b. 束缚水含量与有机质含量含量关系

水。图 3a 展示页岩气储层中实测束缚水孔隙度与粘土含量关系,两者呈现很强的正相关关系,相关系数达到 0.89,表明粘土孔隙是页岩气储层束缚水主要赋存

空间。微细粘土孔隙表面显现亲水性特征,优先吸附和储集水分子,这一点不同于有机孔隙。图 3b 展示束缚水饱和度与有机质之间强烈的负相关关系,相关系数达到 0.82。微细有机孔隙是有机质成熟、演化和脱水作用的产物,其孔隙表面吸附烃类,其表面润湿性为亲油性特征,是烃类的主要储集空间。

粘土孔隙度关系式如下:

$$\Phi_{\text{clay}} = \Phi_{\text{tclay}} V_{\text{clay}} \tag{8}$$

式中: Φ_{clay} 为粘土孔隙度,%; Φ_{tclay} 为 100% 粘土含量时总孔隙度,由邻近泥岩测井响应确定,%; V_{clay} 为测井计算的粘土含量,%。

核磁共振实验通过测定孔隙中水分子中氢核横向弛豫时间来确定岩石总孔隙度和孔隙结构。由于氦气分子直径比水分子小,利用氦气介质能够测量到更小的微孔隙,造成氦气孔隙度比核磁孔隙度大。粘土含量越高,微细粘土孔隙愈发育,两者差异也越大。图 4 中 2 330 ~ 2 350 m 井段,粘土含量高,大于 50%,微粘土孔隙发育,氦气孔隙度与核磁孔隙度差异大,两者差值与粘土孔隙度相当(图 4 中第 6 道 2 330 ~ 2 350 m)。而在 2 390 ~ 2 415 m 井段,粘土含量低,微细粘土孔隙不发育,氦气孔隙度与核磁孔隙度接近(图 4 中第 4 和第 5 道)。

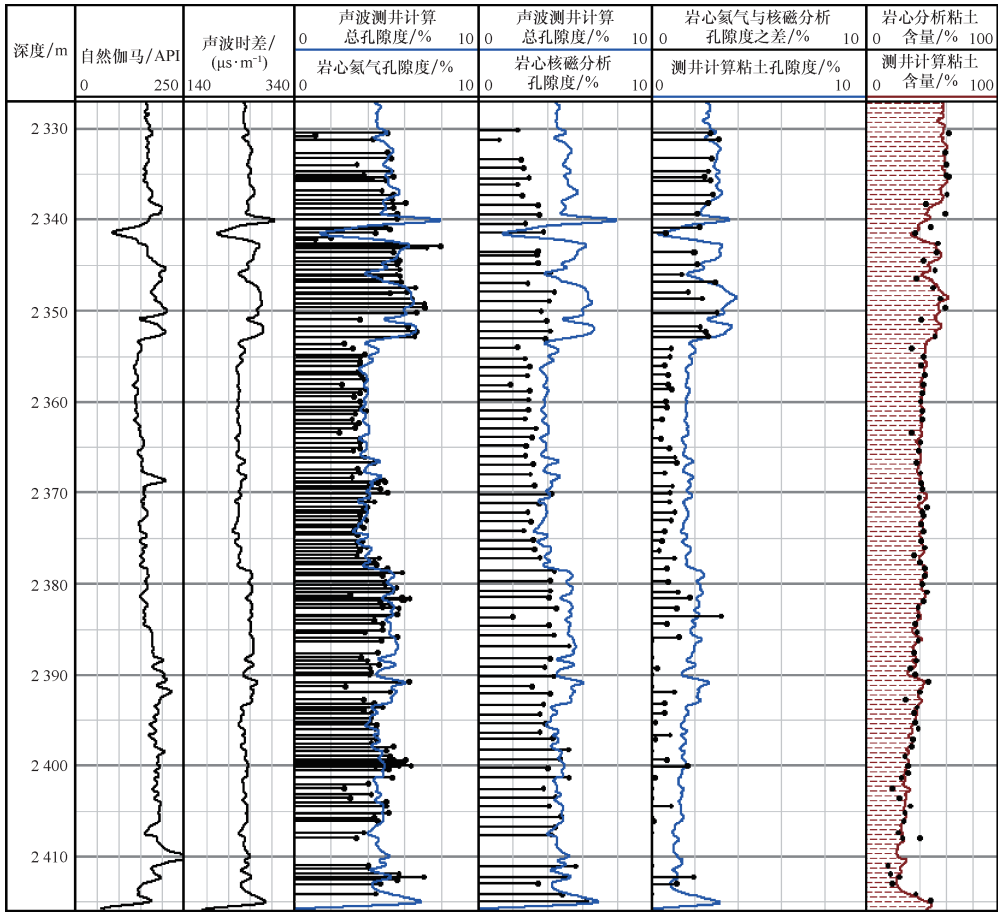


图 4 页岩总孔隙度及粘土孔隙度计算

Fig. 4 Profile of the total porosity and the clay porosity of shale gas reservoir

2.4 裂缝孔隙度计算

页岩中裂缝的发育大大提高了流体渗滤能力,是形成高产页岩气的重要地质因素^[17]。井壁成像测井是研究裂缝最重要的手段,利用成像测井可以直观地确定裂缝类型和裂缝产状,还可定量地确定裂缝密度、宽度和裂缝孔隙度等参数。此外,利用核磁共振测井也能定量确定缝洞、裂缝孔隙度^[18]。

在实际生产中,经常是利用双侧向测井识别和评价裂缝。在页岩气储层中,由于电阻率较高,通常采用双侧向电阻率测井。研究表明,页岩储层中裂缝在双侧向测井上造成了显著响应特征,包括绝对电阻率降低和深、浅电阻率差异性质变化^[19]。通过三维有限元法,开展双侧向测井正反演研究,确定不同裂缝产状、不同基岩电阻率等条件下测井响应特性,在此基础上建立页岩气储层裂缝孔隙度计算模型。

$$C_{LLD} = d_1 X^{d_2} + d_3 C_b^{d_4} \quad (9)$$

$$C_{LLS} = s_1 X^{s_2} + s_3 C_b^{s_4} \quad (10)$$

式中: $d_1, d_2, d_3, d_4, s_1, s_2, s_3, s_4$ 为待定系数; C_{LLD} 为深侧向电导率, S/M; C_{LLS} 为浅侧向电导率, S/M; X 为裂缝

孔隙度与裂缝充填流体电导率的乘积, S/M; C_b 为基岩电导率, S/M。

2.5 碎屑孔隙度计算

在确定总孔隙度 Φ_t 、有机孔隙度 Φ_{org} 、粘土孔隙度 Φ_{clay} 和裂缝孔隙度 $\Phi_{fissure}$ 后,容易得到碎屑孔隙度 Φ_{sd} 。

$$\Phi_{sd} = \Phi_t - \Phi_{org} - \Phi_{clay} - \Phi_{fissure} \quad (11)$$

3 应用实例

对来自四川盆地一口页岩气储层测井资料采用上述方法进行定量处理和评价。地层为志留系龙马溪组海相地层,测井资料包括自然伽马、自然伽马能谱、自然电位、井径、双侧向电阻率、密度、声波时差、中子孔隙度等。

基于四孔隙模型,利用测井数据计算总孔隙度、有机孔隙度、粘土孔隙度、碎屑孔隙度和裂缝孔隙度(图5中第3—第7道)。游离气主要赋存于有机孔隙、微裂缝和部分碎屑孔隙中,粘土孔隙基本为束缚水,依据这种关系可估算游离气含量,吸附气含量则依据岩心实验确定的兰氏方程来确定,游离气与吸附气之和为

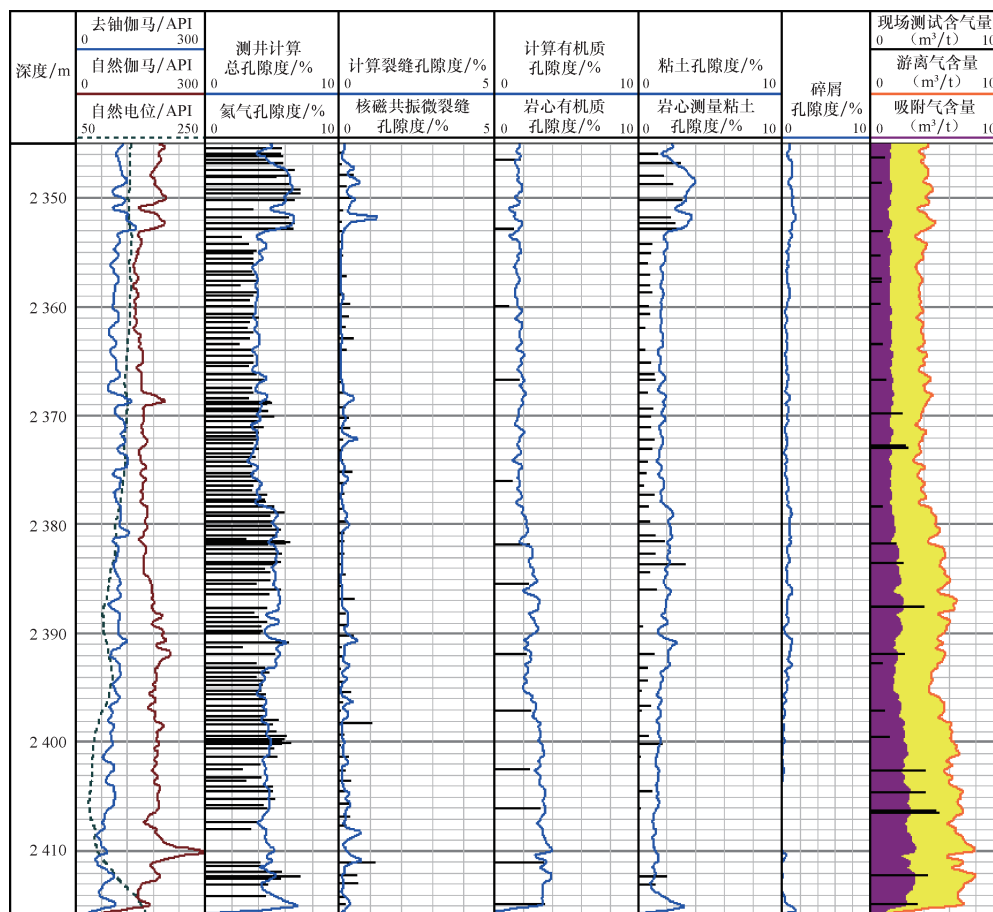


图5 页岩气储层微观孔隙组分、含气量测井评价

Fig. 5 Profile of micropore components and logging evaluation of gas content of shale gas reservoir

总含气量(图5中的第8道)。用这种方法处理得到含气量与现场测试结果趋势一致。

4 结论

1) 通过关键井岩心岩矿、扫描电镜、压汞液氮联测和核磁共振等专项实验,确定页岩气微观矿物组分和孔隙组分,建立“四孔隙”评价模型。在测井资料齐备条件下,依据测井资料可以计算总孔隙度、有机孔隙度、粘土孔隙度、碎屑孔隙度和裂缝孔隙度。

2) 传统砂泥岩电测井含油气饱和度评价方法不适用于页岩气储层。在微观孔隙组分定量评价上,依据各个微观孔隙组分赋存机制,估算游离气含量。

页岩气储层孔隙结构复杂,导电机理复杂,本文旨在基于测井资料精细评价页岩气储层,并作了初步探索。本文提出的方法虽取得一定的效果,但方法并不成熟,甚至存在错误。作者期待抛砖引玉,得到同行专家们帮助和指正!

参 考 文 献

- [1] 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):1624-1632.
Hao Jianfei, Zhou Cancan, Li Xia, et al. Summary of shale gas evaluation applying geophysical logging [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4):1624-1632.
- [2] 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):441-446.
Wan Jinbin, Li Qinghua, Bai Songtao. Well-logging evaluation in shale gas reservoir and its advances [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(5):441-446.
- [3] 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,2011,30:400-405.
Mo Xiwen, Li Zhoubo, Pan Baozhi. Method and advance of shale gas formation evaluation by means of well logging [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30:400-405.
- [4] 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.
Liu Shuanglian, Lu Huangsheng. Evaluation methods and characteristics of log evaluation technology in shale gas [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2):112-116.
- [5] 谢灏辰,于炳松,曾秋楠,等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩有机碳测井解释方法与应用[J]. 石油与天然气地质,2013,34(6):731-736.
Xie Haochen, Yu Bingsong, Zeng Qiunan, et al. TOC logging interpretation method and its application to Yanchang Formation shales, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6):731-736.
- [6] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluation and producing shale gas resources [J]. 2010, SPE131768:1-29.
- [7] 周德华,焦方正,郭旭升,等. 川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4):450-454.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4):450-454.
- [8] 聂海宽,张金川,包书景,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统-下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):335-345.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3):335-345.
- [9] 谢忱,张金川,李玉喜,等. 渝东南渝科1井下寒武统富有机质页岩发育特征与含气量[J]. 石油与天然气地质,2013,34(1):11-15.
Xie Chen, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, et al. Characteristics and gas content of the Lower Cambrian dark shale in Well Yuke 1, Southeast Chongqing [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1):11-15.
- [10] 李娟,于炳松,张金川,等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):364-374.
Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3):364-374.
- [11] Russell W Spears, David Dudas, Andrew Foulds, et al. Shale gas core analysis: strategies for normalization between laboratories and a clear need for standard materials [J]. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium May 14-18 2011.
- [12] Schmoker J W. Determination of organic content of appalachian Devonian shales from formation-density logs [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63:1504-1509.
- [13] Fertl W H, Chilingar G V. Total organic carbon content determined from well logs [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(2).
- [14] Rezaee M R, Slatt R M, Sigal R F. Shale gas rock properties prediction using artificial neural network technique and multi regression analysis, an example from a North American shale gas reservoir [C]. ASEG Extended Abstract, 2007(1):1-4.
- [15] Pemper R R, Han X, Mendez F E, et al. The direct measurement of carbon in wells containing oil and natural gas using a pulsed neutron mineralogy tool [J]. SPE, 2009, 124234.
- [16] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义 [J]. 石油学报, 2011, 32(5):775-782.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5):775-782.
- [17] 巩磊,曾联波,李娟,等. 南襄盆地安棚浅、中层系特低渗储层裂缝特征及其与深层系裂缝对比 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5):778-784.
Gong Lei, Zeng Lianbo, Li Juan, et al. Features of fractures in shallow-to mid-depth reservoirs with ultra-low permeability and their comparison with those in deep reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5):778-784.
- [18] 李军,张超谟,唐小梅,等. 核磁共振资料在碳酸盐岩储层评价中的应用 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(1):48-50.
Li Jun, Zhang Chaomo, Tang Xiaomei, et al. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) data in Carbonate reservoir evaluation [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(1):48-50.
- [19] Tan Maojin, Wang Peng, Li Jun, et al. Numerical simulation and fracture evaluation method of dual laterolog in organic shale [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014 (100):1-13.

(编辑 张亚雄)