

元坝地区大安寨段二亚段页岩气储层 孔隙度计算方法

王 燕,雷有为,付小平,刘苗苗,倪 楷
(中国石化勘探分公司物探研究院,四川 成都 610041)

摘要:元坝地区大安寨段二亚段作为页岩气勘探的新层系,存在着储层孔隙类型复杂、非均质性强、实验分析数据少、孔隙度计算方法不明确的难点。在开展页岩气储层孔隙类型分析基础上,应用6种页岩气测井解释评价技术对储层孔隙度开展计算方法研究。通过分析可知,“核磁共振测井技术”不适用,“拟合模型法”没有办法建立模型,“ANN技术”、“KNN算法”、“声波时差法”和“骨架密度法”这4种技术方法的计算孔隙度的相对误差分别是13%、13%、0.4%和3.7%,其中“声波时差法”误差最小,说明解释精度最高。因此,认为“声波时差法”是目前计算大安寨段二亚段页岩气储层孔隙度最为合适的方法。研究成果推动了元坝地区大安寨段二亚段湖相页岩气的勘探部署。

关键词:页岩气;页岩储层;孔隙类型;孔隙度;大安寨段;元坝地区
中图分类号:TE122 **文献标志码:**A

Calculation method of shale-gas reservoir porosity for the second sub-member of Da'anzhai Member in Yuanba area

WANG Yan, LEI Youwei, FU Xiaoping, LIU Miaomiao, NI Kai
(Geophysical Research Institute of Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: As a new formation for shale gas exploration, the second sub-member of the Da'anzhai Member in the Yuanba area has the difficulties of complex reservoir pore types, strong heterogeneity, few experimental analysis data and unclear porosity calculation methods. Based on the analysis of shale gas reservoir pore types, six shale gas logging interpretation and evaluation techniques are used to study the calculation method of reservoir porosity. The results show that the “NMR logging technology” is not applicable, the “fitting model method” can not build a model, and the relative errors of the calculated porosity of the “ANN technology”, “KNN algorithm”, “acoustic transit time method”, and “skeleton density method” are respectively 13%, 13%, 0.4%, and 3.7%. The “sonic transit time method” has the smallest error, indicating the highest interpretation accuracy. To determine the porosity of the shale gas reservoir in the second sub-member of the Da'anzhai Member, it is believed that the “acoustic transit time method” is the most appropriate method. The findings of the study have encouraged lacustrine shale gas exploration and development in the second sub-member of the Da'anzhai Member in Yuanba area.

Key words: shale gas; shale reservoir; pore type; porosity; Da'anzhai Member; Yuanba area

元坝地区位于四川省东北部广元、南充和巴中市境内,构造位置位于扬子板块北缘,与秦岭褶皱带相邻^[1-5]。该区块大安寨段常规探井测试7口井获得了中高产工业气流。元坝地区大安寨段划分为三个亚段,其中二亚段页岩气储层整体发育,保存条件好,整体具超高压特征。

前人对页岩气储层孔隙度计算方法总体可以概况为三类:第一类是回归分析法,何绪全等^[6]利用“岩心刻度测井”方法,建立起页岩储层孔隙度计算

的地区性经验公式;第二类是利用特殊测井技术,丁娱娇等^[7]应用核磁测井技术对页岩储层孔隙度进行评价,舒志国等^[8]在焦石坝地区采用斯伦贝谢公司的CMR-Plus可组合式核磁共振测井仪测得地层孔隙度数值;第三类是体积模型法,王慧宁^[9]建立起

收稿日期:2021-10-19;改回日期:2022-05-11。

第一作者简介:王燕(1982—),女,高级工程师,现从事测井技术科研生产工作。E-mail: daily09@qq.com。

依据岩石物理体积模型开展孔隙度计算的方法。本文在对前人技术方法继承发展的基础上,从特殊测井技术、数理算法、岩石物理体积模型三个研究

方向入手,采用6种技术方法开展孔隙度计算,通过精度分析及模型优选,最终确定元坝地区大安寨段页岩气储层的孔隙度测井解释方案。

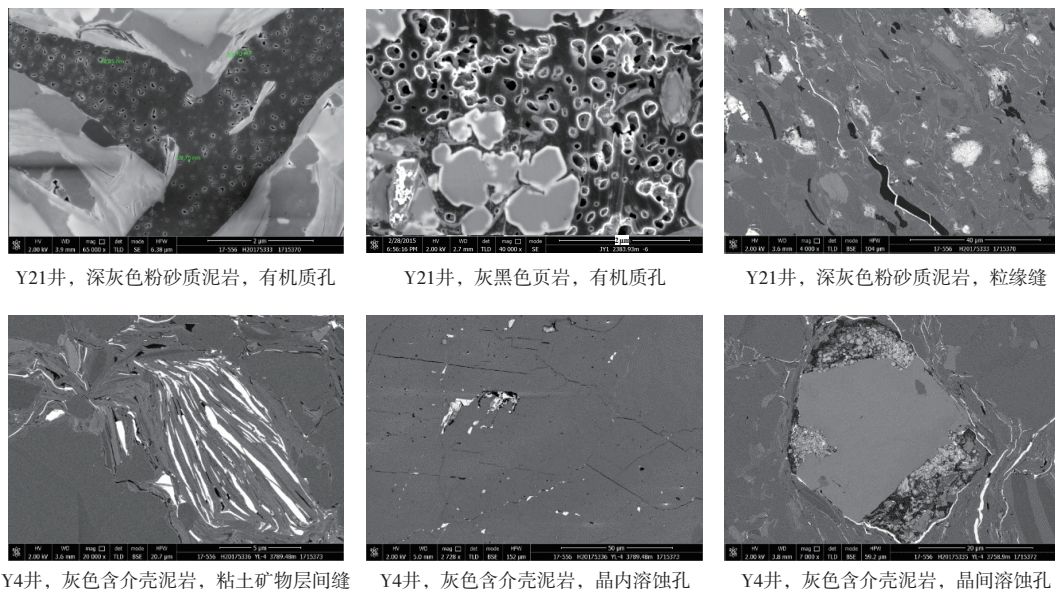


图1 元坝地区大安寨段页岩气储层微观孔隙照片

1 孔隙类型

由9口井50张氩离子扫描电镜照片可知,元坝地区大安寨段二亚段页岩气储层主要发育有机质孔、粒缘缝、溶蚀孔和黏土矿物层间缝,其中,有机质孔孔径主要为20~50 nm,粒缘缝和黏土矿物层间缝孔径主要分布在100~300 nm,溶蚀孔主要发育于长石和方解石晶体内部,发育较少(图1)。

2 孔隙度计算方法

在对前期理论方法研究总结的基础上,分别采用核磁共振测井技术、拟合模型法、ANN技术、KNN算法、声波时差法和骨架密度法,共计6种技术方法计算研究区孔隙度。同时,利用研究区Y4井49个和Y2井29个岩心氩气孔隙度样品资料对模型进行精度分析及优选,最终确定元坝地区大安寨段二亚段页岩气储层的孔隙度计算方法。

2.1 核磁共振测井技术

核磁共振测井是目前较为先进的测井技术^[10-12]。与其他常用测井技术相比,核磁共振技术能直接获取地层中氢原子信息,能够直接获得孔隙度信息。

以Y4井大安寨段为例,绘制核磁测井孔隙度

与49个岩心氩气法孔隙度对比图(图2),由图可知核磁共振测井孔隙度与岩心氩气法孔隙度,两者之间匹配性差,误差较大。

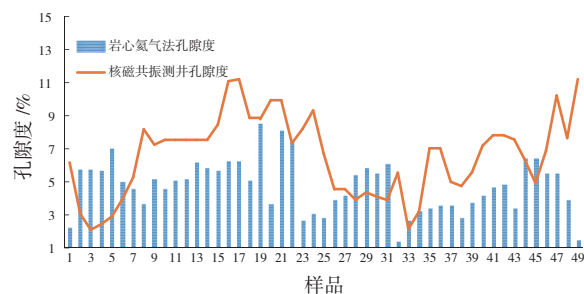


图2 Y4井岩心氩气法与核磁共振测井孔隙度对比

尽管在理论上,核磁共振测井技术是测量孔隙度的最佳选择。但实践中发现,针对大安寨段页岩气储层这样的孔隙类型,现有的核磁共振测井技术还不适用。

2.2 拟合模型法

Y2井大安寨段页岩气储层29个岩心氩气法孔隙度数据同10条常规测井曲线进行相关性分析,得到两者的相关系数(表1)。由表可知,两者相关系数在10.69%~36.20%之间。由此可知,难以建立解释精度较高的单元或多元拟合模型。

因此,探索性地应用人工神经网络技术和机器学习算法,建立非线性的孔隙度计算模型。

表 1 Y2 井孔隙度的相关系数氦气法与测井数据

测井曲线	相关系数 R	测井曲线	相关系数 R
GR	0.305 29	RD	-0.111 94
KTH	0.253 99	RS	-0.106 91
DEN	-0.159 95	U	0.286 62
AC	0.362 04	TH	0.295 27
CNL	0.274 39	K	0.149 95

2.3 ANN 技术

人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)具有非线性和分布式存储的特征^[13-15]。ANN 用于建立孔隙度计算模型有独特的优势,该方法是非线性算法模型,省略了系统建模过程。

2.4 KNN 算法

KNN 算法也叫 K-近邻机器学习(KNN, k-nearest neighbor),是一种基于统计的分类算法^[16]。通过分析评价参数与常规测井曲线的相关性,优选出自然伽马、声波时差、中子测井曲线参与孔隙度建模。

2.5 声波时差法

声波时差与地层孔隙度有关,因此可以根据声波时差、岩石骨架速度和流体速度确定均匀颗粒间孔隙度。这种关系可以表示成如下的方程:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \tag{1}$$

式中, ϕ 为岩石的孔隙度,%; Δt 为目的层的声波时差, $\mu s/ft$; Δt_{ma} 为岩石骨架的声波时差, $\mu s/ft$; Δt_f 为孔隙内流体的声波时差, $\mu s/ft$ 。

2.6 骨架密度法

测井得到的体积密度是岩石骨架和孔隙流体密度的综合响应,即由岩石体积模型得到孔隙度表达式:

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \tag{2}$$

上式中, ρ_{ma} 为骨架密度, g/cm^3 ; ρ_b 为测井所得体积密度, g/cm^3 ; ρ_f 为孔隙流体密度, g/cm^3 ; 上述孔隙度求取公式中最重要的参数是骨架密度,其值可以利用岩心 X 衍射全岩分析资料,结合各种矿物密度值求得,其计算公式如下:

$$\rho_{ma} = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_n V_n \tag{3}$$

$$1 = V_1 + V_2 + \cdots + V_n \tag{4}$$

上式中, $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ 分别为地层中黏土、石英、方解石、白云石等矿物密度, g/cm^3 , 具体数值见表 2; V_1, V_2, \cdots, V_n 分别为全岩矿物 X 衍射分析得到的地层中黏土、石英、方解石、白云石等矿物体积数, %。

表 2 各种矿物的密度理论值

序号	矿物名称	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	序号	矿物名称	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
1	黏土	1.50~2.20	6	菱铁矿	3.80~3.90
2	石英	2.65	7	黄铁矿	4.90~5.20
3	长石	2.55~2.63	8	石膏	2.20~2.40
4	方解石	2.71	9	硬石膏	2.70~3.00
5	白云石	2.87			

将各种矿物理论值和全岩矿物 X 衍射分析结果代入上式,即可求得地层骨架密度(表 3)。

表 3 元坝地区侏罗系大安寨段地层骨架密度(部分数据)

岩性	X 衍射全岩分析各矿物体积分数/%									骨架密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
	黏土	石英	长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	石膏	硬石膏	
泥质粉砂岩	35.9	55.7	2.3	2.6	1.7	1.1	0.2	0.0	0.5	2.514
粉砂质泥岩	35.1	57.1	1.5	2.7	2.2	0.9	0.0	0.0	0.5	2.511
灰质细砂岩	10.4	26.4	0.4	61.1	1.0	0.3	0.4	0.0	0.0	2.656
灰黑色泥岩	52.7	36.0	1.2	5.8	2.1	1.3	0.8	0.1	0.0	2.457

2.7 精度分析

以 Y2 井为例,分别绘制 ANN 技术、KNN 算法、声波时差法和骨架密度法,计算孔隙度与大安寨段

页岩气储层 29 个岩心氦气法孔隙度样品对比图和交会图(图 3-图 4)。由图可知两者匹配性较好,相关系数分别为 71.11%、72.68%、81.36% 和 74.91%。

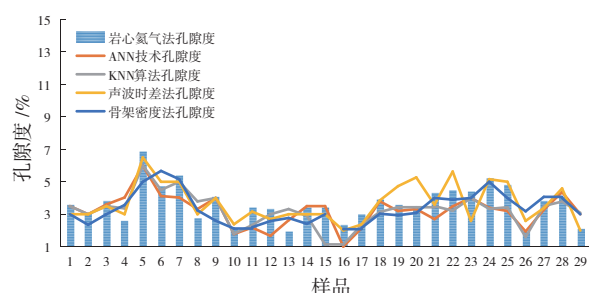


图3 Y2井大安寨段岩心氦气法与多方法计算孔隙度对比

由上述研究可知,“核磁共振测井技术”不适用于大安寨段二亚段页岩气储层;“拟合模型法”没有办法建立起相应的拟合模型。因此,目前只通过

“ANN技术”、“KNN算法”、“声波时差法”和“骨架密度法”这4种技术方法计算出Y2井大安寨段二亚段泥页岩段的孔隙度。

将这4种测井方法计算的孔隙度与岩心氦气法得出的孔隙度进行对比分析可知(表4):“声波时差法”与其余三种方法计算得到的孔隙度相比,平均差值和相对误差均较低,相关系数较高,该方法是基于常规测井资料建立起的孔隙度计算模型,因此较为快捷且费用相对较低。综合分析认为,应用“声波时差法”计算元坝地区大安寨段二亚段页岩气储层的孔隙度最为合适。

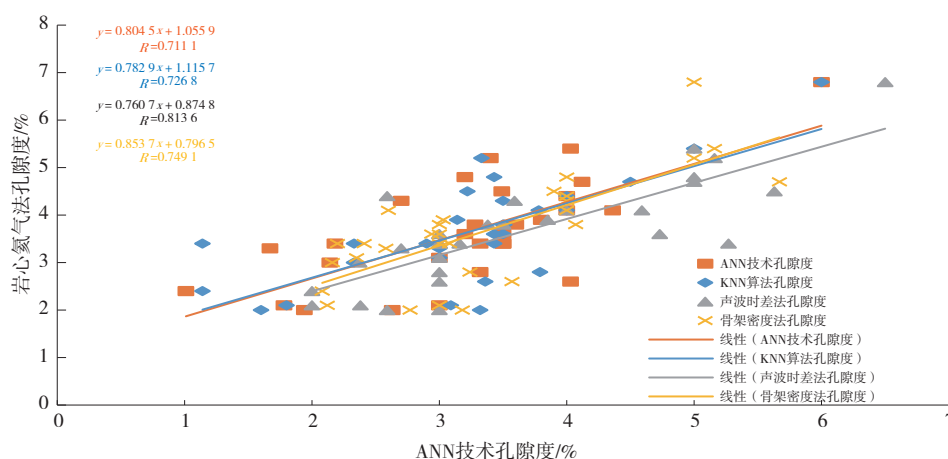


图4 Y2井大安寨段岩心氦气法与多方法计算孔隙度交会

表4 Y2井大安寨段二亚段页岩气储层岩心氦气法与测井计算孔隙度误差分析统计

计算方法	平均值/%		平均差值/%	相对误差/%	相关系数	数据点/个
	测井计算	岩心氦气法	(测井-岩心)	(测井-岩心)/岩心		
ANN技术	3.655	3.231	0.424	0.131	0.711 1	29
KNN算法	3.654	3.231	0.423	0.131	0.726 8	29
声波时差法	3.244	3.231	0.013	0.004	0.813 6	29
骨架密度法	3.349	3.231	0.118	0.037	0.749 1	29

3 结论

(1)元坝大安寨段页岩气储层孔隙类型主要为有机质孔、粒缘缝、溶蚀孔和黏土矿物层间缝。

(2)虽然理论上核磁共振测井技术是测量孔隙度的较优选择,但孔径以微孔和介孔为主的大安寨段页岩气储层,现有的核磁共振测井技术还不太适用。

(3)结合各种方法的技术原理及孔隙度解释精

度分析可知,认为“声波时差法”是较为适应于元坝地区大安寨段二亚段页岩气储层的孔隙计算方法。

参考文献:

- [1] 何发岐,朱彤.陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地侏罗统为例[J].石油实验地质,2012,34(3):246-251.
- [2] 刘苗苗,付小平.元坝地区陆相页岩气勘探潜力再评价[J].四川地质学报,2020,40(3):416-421.

(下转第50页)

- [9] 蔡军,张恒荣,曾少军,等.随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用[J].石油学报,2016,37(3):371-381.
- [10] 冯进,张中庆,罗虎.随钻电磁波电阻率和电缆电阻率测井联合反演及应用[J].测井技术,2015,39(1):21-26.
- [11] 黄琳,于增辉,柳杰.一种基于电成像测井和双侧向测井的联合反演方法[J].中国海上油气,2017,29(3):46-51.
- [12] 成志刚,孙宝佃,刘振华,等.高分辨率双侧向测井和双感应测井数据联合反演研究与应用[J].测井技术,2010,34(6):542-547.
- [13] 别康,徐观佑,万文春,等.差分进化算法在双侧向和双感应测井联合反演中的应用[J].测井技术,2015,39(6):704-709.
- [14] 倪小威,徐思慧,冯加明,等.基于自适应差分进化算法的阵列侧向测井快速反演[J].计算物理,2019,36(4):465-473.
- [15] 熊杰,刘彩云,邹长春.基于粒子群优化算法的感应测井反演[J].物探与化探,2013,37(6):1141-1145.
- [16] 张倩,王玲,江沸菠.电阻率层析成像的二维改进粒子群优化算法反演[J].物探与化探,2015,39(5):1047-1052.
- [17] 潘永湘,刘庆丰,高红梅.混沌在模糊控制规则优化中的应用研究[J].西安理工大学学报,2000,16(3):252-255.
- [18] 杨玮,党培,傅卫平,等.基于多色集合的改进DPSO求解进出库调度[J].计算机仿真,2015,32(2):395-399.
- [19] 刘杰,张耿,冯向朋,等.基于三次样条拟合插值的高精度质心定位方法[J].光学学报,2021,41(12):124-130.

(编辑 刘义梅)

(上接第10页)

- [3] 李军,王世谦.四川盆地平昌—阆中地区侏罗系油气藏主控因素与勘探对策[J].天然气工业,2010,30(3):16-21,126-127.
- [4] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等.四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J].石油学报,2011,32(1):8-17.
- [5] 郭彤楼,李宇平,魏志红.四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J].天然气地球科学,2011,22(1):1-7.
- [6] 何绪全,黄东,赵艾琳,等.川中地区大安寨段页岩油气储层测井评价指标体系[J].岩性油气藏,2021,33(3):129-137.
- [7] 丁娱娇,郭保华,燕兴荣,等.页岩储层有效性识别及物性参数定量评价方法[J].测井技术,2014,38(3):297-303.
- [8] 舒志国,关红梅,喻璐,等.四川盆地焦石坝地区页岩气储层孔隙参数测井评价方法[J].石油实验地质,2018,40(1):38-43.
- [9] 王慧宁.基于体积模型法的孔隙度计算方法研究[J].石化技术,2020,27(12):78-79,49.
- [10] 肖立志,谢然红,廖广志.中国复杂油气藏核磁共振测井理论与方法[M].北京:科学出版社,2010:10-40.
- [11] 邵维志,丁娱娇,刘亚,等.核磁共振测井在储层孔隙结构评价中的应用[J].测井技术,2009,33(1):52-56.
- [12] GE X M, FAN Y R, CAO Y C, et al. Reservoir pore structure classification technology of carbonate rock based on NMR T2 spectrum decomposition[J]. Applied Magnetic Resonance, 2014, 45(2): 155-167.
- [13] XIAO L, MAO Z Q, ZOU C C, et al. A new methodology of constructing pseudo capillary pressure (Pc) curves from nuclear magnetic resonance (NMR) logs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 147(4): 154-167.
- [14] 焦李成.神经网络系统理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,1990:30-42.
- [15] 胡俊. BP人工神经网络在计算含水饱和度中的应用研究[J].天然气工业,2000,20(2):39-41.
- [16] 胡元,石冰.基于区域划分的KNN文本快速分类算法研究[J].计算机科学,2012,39(10):182-186.

(编辑 刘义梅)