

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0613-07

测井资料评价次生孔隙的方法、原理及实例

张振城¹ 孙建孟¹ 施振飞^{1,2} 蔡晓明² 苏远大¹ 廖东良¹

¹(石油大学(华东) 山东东营 257061) ²(中国石油化工股份公司江苏油田分公司 江苏扬州 225265)

摘要 结合高邮凹陷地区实际地质情况,在地质、地震及岩芯分析的基础上,对次生孔隙的成因机制从测井角度进行了分析讨论。主要从以下几方面研究:1)利用整个井段的声波测井资料可以识别成岩阶段,划分次生孔隙发育的起始层段;2)分析利用声波孔隙度与密度、中子孔隙度差值求取次生孔隙度的适用条件和范围,依条件的不同进行方法的选取;3)利用声波—电阻率幅度差法量化烃源岩中有机质含量,分析有机质经过热解后产生的有机酸对砂体产生的溶蚀作用,判断由此导致的次生孔隙发育情况;4)利用声波时差辨识异常高压层段,分析次生孔隙的发育和保存。以上方法经过实例验证,效果明显。

关键词 测井资料 次生孔隙 粘土矿物 有机酸 异常高压

第一作者简介 张振城 男 1977年出生 博士研究生 储层敏感性与产能预测

中图分类号 TE122.2 P618.130.2 **文献标识码** A

1 引言

测井资料是对地质体的较全面反映,它包含了丰富的地质信息,具有精确度高,信息丰富等特点。特别是近年来各种新仪器和新技术的不断投入使用,使得测井对地层的反映能力越来越准确,已经成为地质研究人员不可或缺的重要手段。

次生孔隙研究是加强储层开发的重要环节和重要研究内容。目前,从前人研究^[1~10]来看,研究次生孔隙的主要途径是基于室内试验分析的岩芯地质方法,这种方法准确直接,但较费时且成本较大,对未取芯井段的分析往往失于偏颇。从成因机理来看,次生孔隙具有不同于原生孔隙的特征,与测井信息有着紧密的联系。充分发掘测井信息,加强对测井资料的研究和使用,是对次生孔隙评价手段的重要补充。本文结合地质资料,阐述了测井资料在次生孔隙发育阶段识别及成因机制等方面的应用。高邮凹陷阜宁组储层为中低孔低渗储层,储集空间以次生孔隙为主,应用测井资料进行储层的次生孔隙研究效果非常明显,本文结合高邮凹陷实例进行了分析说明。

2 测井资料划分次生孔隙发育阶段

声波测井资料已被广泛地应用于沉积地层的孔隙度、地层异常压力等研究中,是研究储层物性的有

利工具。根据威利公式可知,孔隙度与声波时差之间具有一定的关系^[11,12]:

$$t = (1 - \phi) t_{ma} + \phi t_f = \phi (t_f - t_{ma}) + t_{ma}$$

式中: t —所测得的声波时差值, $\mu s/m$; t_{ma} —岩石骨架声波时差, $\mu s/m$; t_f —岩石孔隙流体的声波时差, $\mu s/m$; ϕ —岩石孔隙度, 小数。

对于沉积地层中孔隙度与深度的相关性,不同的现场人员有不同的解释。操应长等认为,在正常埋藏压实条件下,二者呈线性关系,而声波时差的对数与深度呈线性关系^[12]。为了研究问题的方便,在研究相同沉积层段时,只要层段深度段不是很长,经常将声波时差与深度的关系视作直线关系。但在不同的成岩作用层段,或者相同沉积层段内由于压实程度的不同,直线的斜率会发生明显的变化。正常压实情况下,随着深度的增加,孔隙度是逐渐下降的,所以声波时差往往会随着深度的增加而呈直线下降。但是,伴随着成岩作用的进行,特别是在成岩作用的中期^[13],次生孔隙开始发育,总孔隙度随深度减小的趋势开始变缓。与此相对应,声波时差随深度变化的梯度关系会发生变化,集中表现为直线的斜率会发生改变。这样通过判断直线斜率的变化情况,识别出成岩作用的阶段^[13],分清次生孔隙发育层段的起始点。该法在识别非裂缝性次生孔隙储层方面具有优势。

对于高角度裂缝较为发育的次生孔隙来讲,可以

利用中子孔隙度测井、密度孔隙度测井及声波孔隙度测井综合识别。从测井原理来看,声波时差对高角度裂缝的影响不敏感,受骨架与粒间孔隙的影响较大。所以,由中子、密度测井计算总孔隙度,声波时差计算原生孔隙度,二者之差即为次生孔隙度(裂缝孔隙度)的大小^[11,13],文献[13]给出了该法的分析及实例^[13]。但是,对于非裂缝为主的次生孔隙(例如粒间溶孔等),次生孔隙的判断和求取在沿用该法时要慎重。因为由声波时差所得到的孔隙度是次生孔隙度与原生孔隙度的和,并非单纯的原生孔隙度,如果沿用该法,会使得次生孔隙度值偏小,甚至得不到次生孔隙度值,在识别次生孔隙(例如粒间溶孔等)发育层段方面效果不理想。

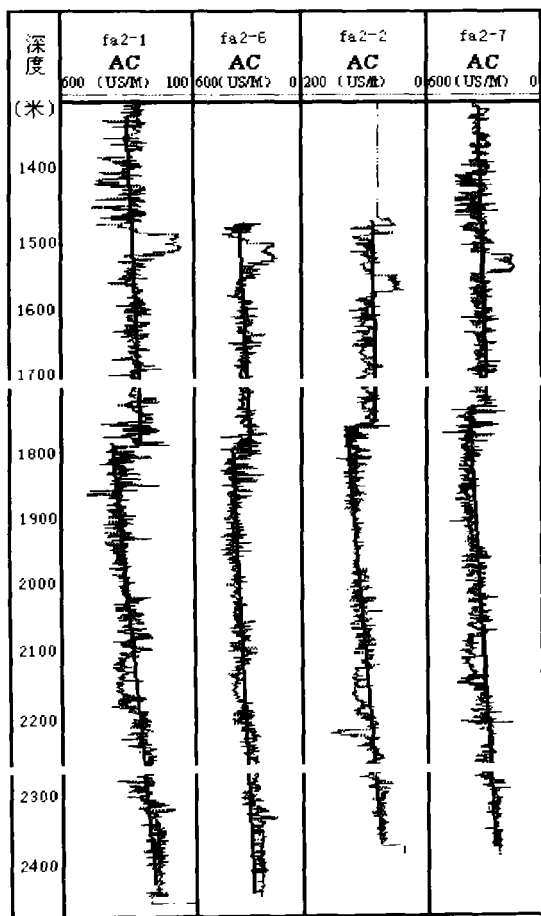


图 1 利用声波时差识别次生孔隙发育层段

Fig 1 Identifying secondary porosity development interval by sonic logging

通过薄片实验统计分析,发现江苏油田高邮凹陷阜宁组次生孔隙包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、特大孔、裂隙、微孔隙等,其中粒间溶孔尤为发育,占整

个次生孔隙的 88.82%,故不能采用总孔隙度减去声波时差孔隙度的思路。所以采用声波时差与深度之间的关系对次生孔隙发育的起始层段进行了分析。统计发现,如图 1 所示,高邮凹陷地区不同井位(如 fa2-1、fa2-2、fa2-6 及 fa2-7 等)正常压实与非正常压实的转折点有所不同,但正常压实的底界在 1700~1800 m 之间,这符合目前成岩作用领域得出的正常压实的底界值(1200~1800 m)及油气运移领域所得出的正常压实的底界值(小于 2000 m)^[13]。对该区进行的孔隙度室内分析统计结果如图 2 所示,次生孔隙在 1500 m 以下开始形成,具体的起始深度依构造部位的不同而有所变化,一般来讲,北斜坡次生孔隙发育的起始深度比深凹部要浅一些。很明显,在此界面之下,伴随着各种成岩作用的进行,次生孔隙开始大量发育,如表 1 所示,各项指标均显示成岩作用开始步入中晚期阶段(晚成岩 A 期),孔隙类型以次生孔隙为主。

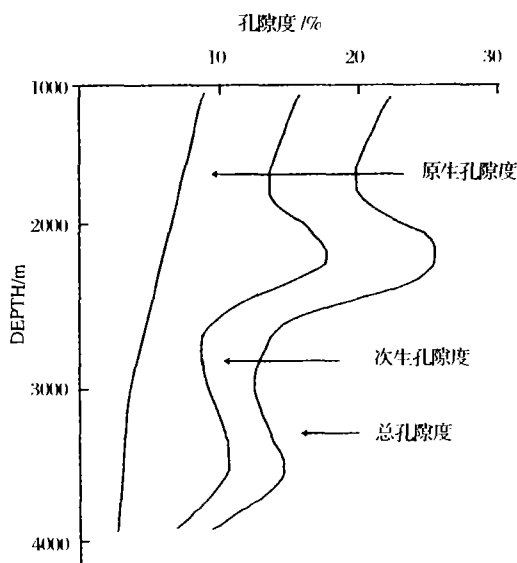


图 2 高邮凹陷阜宁组孔隙纵向演化规律

Fig 2 Porosity distribution with depth in Gaoyou Depression

3 测井资料评价次生孔隙

3.1 声波—电阻率幅度差法分析次生孔隙成因

大量研究证实,烃源岩中有机质丰度及烃源岩有机质的类型与储集层次生孔隙的发育程度密切相关,其演化趋势相关性较好:有机质含量高且有机质类型好的烃源岩在成熟时释放出的有机酸绝对量、相对量都较大,有机酸对碳酸盐矿物的溶解会产生次生孔隙^[16]。在此过程中有两种溶蚀机理:一是有机酸经

表 1 高邮凹陷成岩阶段划分

Table 1 The diagenetic stages of clastic rock in Gaoyou Depression

成岩阶段		有机质		泥质岩		砂岩中自生矿物							次生溶蚀	机械压实	孔隙类型
阶段	亚期	$R_o/\%$	成熟带	I/S 中 S/%	混层类型	蒙皂石	I/S 混层	高岭石	伊利石	绿泥石	石英加大级别	方解石			
早成岩	B	0.35 0.6	低成熟	>50	无序混层	■	■	■	■	■	I 级	■	■	■	原生孔与次生孔并存
晚成岩	A	0.6 1.0	成熟	50 20	部分有序混层	■	■	■	■	■	II 级	■	■	■	次生孔为主
	B	>1.0	成熟	<20	有序混层	■	■	■	■	■	III 级	■	■	■	次生孔减少

脱羧作用产生 CO_2 , 从而使碳酸盐矿物溶解; 二是有机酸离解出 H^+ 对碳酸盐矿物产生溶解作用^[13-9]。因此, 烃源岩的有效识别是了解次生孔隙成因机理的重要内容。

除烃源岩的室内实验方法外, 可以利用测井资料进行烃源岩的识别。例如可以通过岩芯统计分析法识别烃源岩^[17], 但此法以岩芯分析数据为基础, 精确度受制于实验效果。除此之外, 国内外的很多学者在岩芯实测数据标定的基础上, 利用声波时差—电阻率的幅度差法来量化富含有机质的烃源岩和有机质总量 (TOC)^[12, 17]。其原理是在同一坐标下应用不同的坐标刻度, 绘制声波时差与电阻率曲线, 在同一沉积体系下, 使有机质含量很低 (或不含有有机质) 的泥岩地层的电阻率曲线和声波时差曲线相重合。两条曲线的幅度差定义为 $\log R$, 在一般情况下 $\log R$ 与烃源岩中的 TOC 近似于成正比关系^[17]。可以利用下式定量计算有机质总量 TOC:

$$\log R = \log(R/R_B) + A(t - t_B)$$

$$TOC = \log R \times 10^{(2.297 - 0.88ALOM)}$$

式中 R_B —重叠段地层电阻率平均值, 欧姆米; t_B —重叠段地层的声波时差平均值, 微秒/米; A —计算参数, 依井位的不同而不同; R , t —分别为地层电阻率及声波时差; TOC—有机质总量。

利用上述方法进行测井资料处理, 得到了富深 x1 井阜一段和阜二段烃源岩有机质处理结果 (限于该井测井资料, 只对阜一、阜二段进行了处理), 如图 3 所示。根据苏北地区烃源岩评价标准 (如表 2), 对

阜一段和阜二段的有机质总量 (TOC) 进行了评价: 阜二段烃源岩有机质总量要优于阜一段烃源岩, 烃源岩有机质总量 TOC 指标绝大多数大于 1, 甚至达到 2 以上。对富深 X1 井阜宁组暗色泥岩进行的实验室分析 (表 3) 证实了判定结果: 1) 阜一段局部可能发育具生烃能力的烃源岩; 2) 阜二段烃源岩为优质烃源岩。结合前人研究成果, 这两层段烃源岩均已达到烃源岩的门限深度, 进入了成熟或高成熟阶段, 这对次生孔隙的形成具有重要的建设性作用。取芯分析证明, 阜二段次生孔隙发育程度要优于阜一段。

表 2 苏北第三系烃源岩有机质丰度评价标准

Table 2 The assessment standard of organic matter abundance of Tertiary source rocks in Subei basin

指标	非	差	较好	好	很好
TOC/%	<0.4	0.4~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0	>2.0
氯仿沥青“A”/%	<0.01	0.01~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	>0.2
HC/($\times 10^{-6}$)	<100	100~200	200~500	500~1000	>1000
$S_1 + S_2$ /(mg/g)	<0.5	0.5~2.0	2.0~6.0	6.0~20.0	>20.0

3.2 声波测井用于评价次生孔隙的成因及保存

地层的异常高压对于次生孔隙的形成及保存具有不可忽视的作用。主要表现在两方面: 1) 异常高压带内往往富含有机质丰富的烃源岩, 在热解作用下产生的有机酸和二氧化碳会使邻近的砂体发生溶蚀, 形成次生孔隙^[18]; 2) 异常高压的形成有利于次生孔隙的保存^[16, 18]。

多年来, 利用测井资料检测地层异常高压已经得

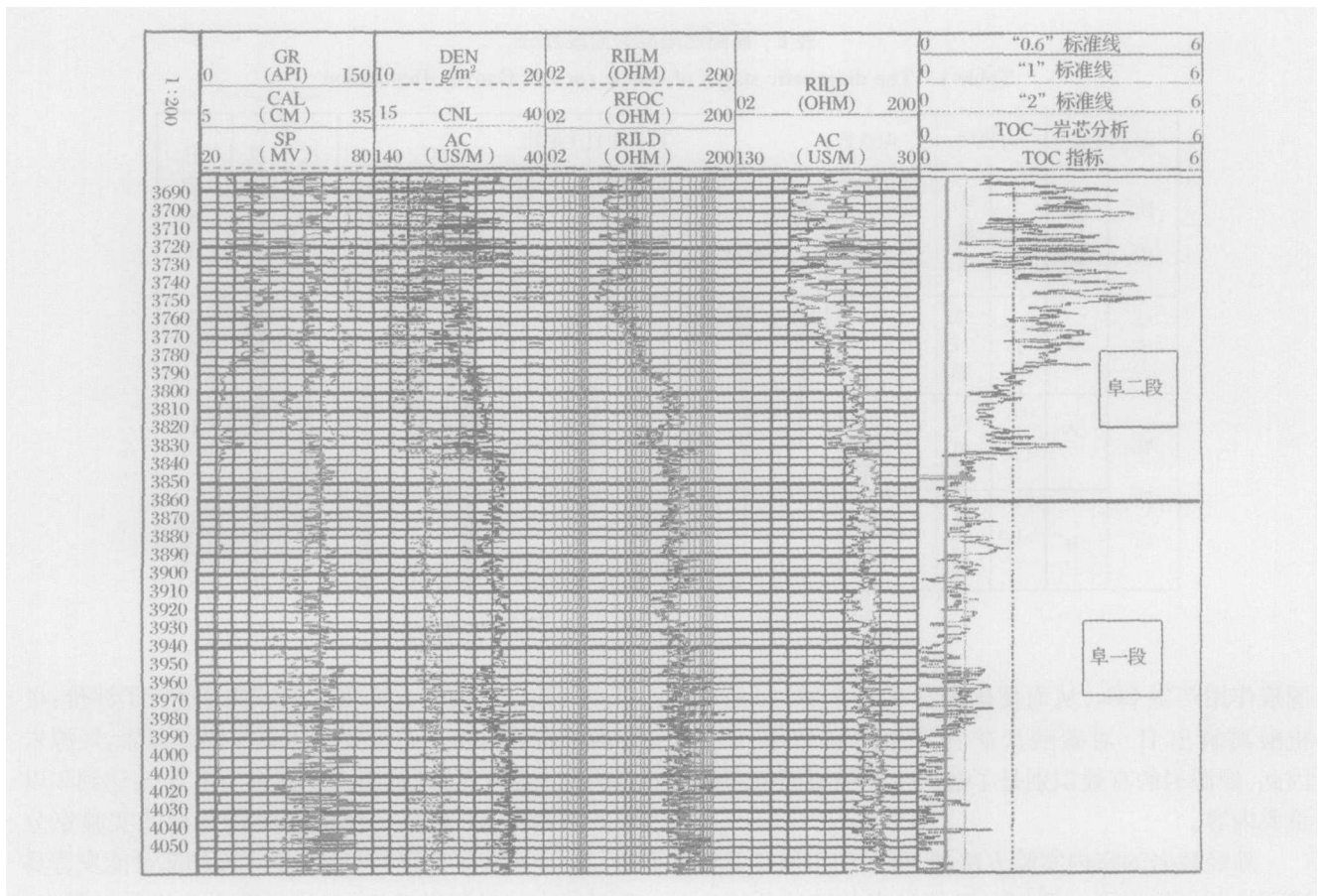


图 3 富深 X1 井烃源岩声波—电阻率重叠法评价烃源岩

Fig 3 The analysis of source rocks with t and R_t in Fushen X1

表 3 富深 X1 井阜宁组暗色泥岩有机质丰度及成熟度指标

Table 3 The criterion of organic matter in Fushen Formation source rocks in Fushen X1

深度 /m	层位	R_o /%	氯仿沥青“A”分析的		计算的
			/%	TOC /%	TOC /%
3322.9	阜四段	0.739	0.0348	0.37	-
3326.65	阜四段	0.636	0.0542	0.51	-
3329.27	阜四段	0.735	0.1886	2.73	-
3560.23	阜三段	0.996	0.0315	1.18	-
3564.16	阜三段	1.007	0.0302	0.94	-
3845.04	阜二段	1.116	0.3181	0.96	1.078
3846.74	阜二段	1.198	0.4098	1.13	0.779
3850.54	阜二段	1.143	0.3378	0.86	0.831
3946.44	阜一段	1.152	0.0378	0.18	0.226
3953.94	阜一段	1.164	0.2887	1.08	1.194
4047.81	阜一段	-	0.0054	0.14	0.246

到了施工现场的认可,方法很多。王越之指出,任何一种可以检测地层岩石孔隙度变化的测井方法都可以用来检测地层压力^[19]。综合考虑各种测井系列的适用条件及影响因素,其中声波测井在制作正常压

实趋势线方面是公认的较精确的方法。另外邓兴德采用了多种测井曲线统计回归预测地层高压^[19]。由于异常高压带内保存较高的孔隙,导致声波时差值出现高值,据此识别异常高压段。

利用声波测井(声波时差 t 的对数)及地层深度(D)预测异常压力的原理(等效深度法)如图 4 所示。图中标出了正常压实趋势线,正常压实带及异常压实带。A 点地层压力值等于 n 点地层压力值,即 $p_{fa} = p_{fn}$,此时深度 D_n 就是 D_a 的等效深度:

$$D_n = K \cdot \lg t + b$$

其中: K —正常压实趋势线斜率,无量纲; t —声波测井时差, $\mu s/m$; b —趋势线截距, m 。

则 A 点处地层异常流体压力为:

$$p_{fa} = g_o D_A - (g_o - g_{fn}) D_n$$

式中: g_o —覆盖层密度, g/cm^3 ; g_{fn} —地层水密度, g/cm^3 ; g —重力加速度, N/m 。

高邮凹陷阜宁组地质分析和实测压力资料显示,其内部存在着多个欠压实成因的异常高压带,其范围

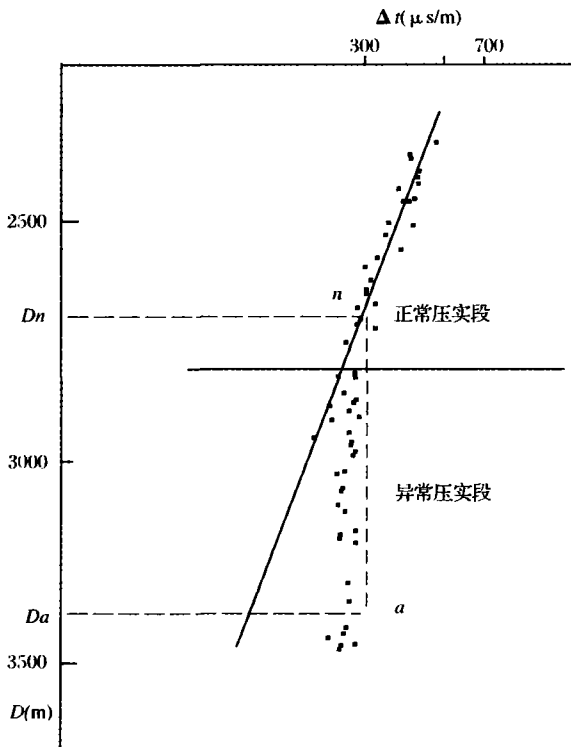


图 4 等效深度法图解

Fig 4 Plot showing the principle of equivalent depth

涉及到金湖凹陷、白驹凹陷和海安凹陷的东北部,隆起的分隔使各异常高压带彼此不沟通,各自拥有独立的压力体系。对富深 X1 井进行了综合研究,依据声波时差对数与深度之间的直线关系^[20],制作了正常压实趋势线。覆盖层密度选用 2.3 g/cm^3 ,地层水密度选用 1.05 g/cm^3 ,利用等效深度法进行异常压力预测。如图 5 所示,其中阜三段 3 544 ~ 3 569 m 井段及阜二段底部声波时差值较高,偏离了砂岩正常压实趋势线,与之相对应的异常压力计算值较高,最高点 3 558.3 m 处异常高压达到 248.32 kg/cm^2 。这可由几方面得到证实:地震剖面及地质资料显示,上部的泥岩盖层、斜坡及侧旁的同生盆倾断层封隔实际构成了异常高压圈闭带;地层压力测试证实其内部压力系数在 1.5 以上,个别达到 1.8 ~ 2.0;在钻井过程中,为了抑制井涌,该层段实用钻井泥浆的平均密度达到 1.35 g/cm^3 ,而上部泥浆密度仅为 1.21 g/cm^3 。岩芯分析证实该段次生孔隙较为发育,次生孔隙度范围在 0.88% ~ 18.29% 之间,平均值达到 7.83%。从该层沉积及成岩过程来看,由于受沉积物沉积厚度及沉积速度快的影响,地层产生了不均衡压实,造成了局部异常高压的形成。从时间上分析,异

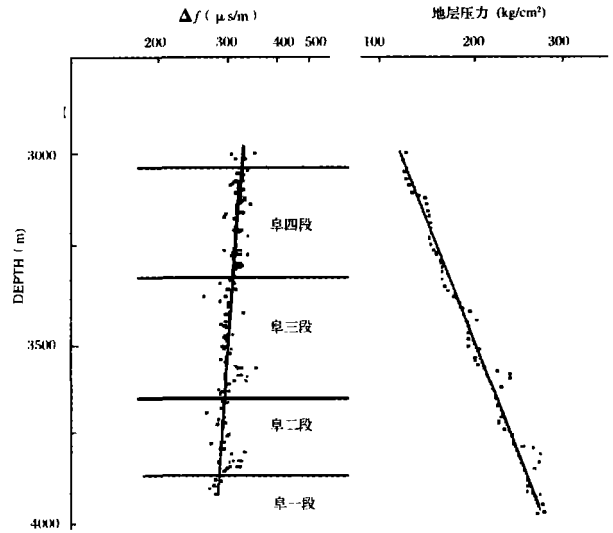


图 5 富深 X1 井异常高压识别

Fig 5 The abnormal high pressure in Fushen X1

常高压的形成晚于次生孔隙(烃源岩有机质溶蚀产生)的形成,这样由原来颗粒支撑的一部分地层负荷转移为由地层流体来支撑^[16,18]。由此可见,异常高压对其内部储层的压实起到了阻止作用,使阜三段次生孔隙保存了下来,这是阜三段储层次生孔隙得以保存的很重要原因。

4 基于测井资料计算次生孔隙大小

次生孔隙的形成受多重因素的控制,单纯利用某一参数对次生孔隙建模是不合适的。如图 6 所示,孔隙度与声波时差、密度等相关性并不好。综合各种因素,高邮凹陷地区次生孔隙的形成受地层水矿化度及各种作用产生酸性液的溶蚀作用影响较强。通过对各种因素进行分析,选取与次生孔隙相关性较好的地层水矿化度、声波时差及碳酸盐含量等三参数进行次生孔隙度建模,通过多元统计回归得到了高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙度计算公式:

$$\phi_r = 9.390 - 0.585 \text{ ppm} + 0.012 t - 29.8V_{ca}$$

式中: ϕ_r —次生孔隙度,%; t —声波时差, $\mu\text{s/m}$; ppm —地层水矿化度相对值, $\text{ppm} = (\text{ppm}_{\text{max}} - \text{ppm}) / (\text{ppm}_{\text{max}} - \text{ppm}_{\text{min}})$, %; V_{ca} —碳酸盐含量, %。

根据上述预测模型编制程序,对单井次生孔隙进行了计算。将计算结果与岩芯实验结果进行了对比,平均误差为 9.2%,表 4 为部分样本的比较情况。能够满足生产计算要求,可以用于下一步的计算。据此划分出了次生孔隙的有效发育层段,然后结合区内储

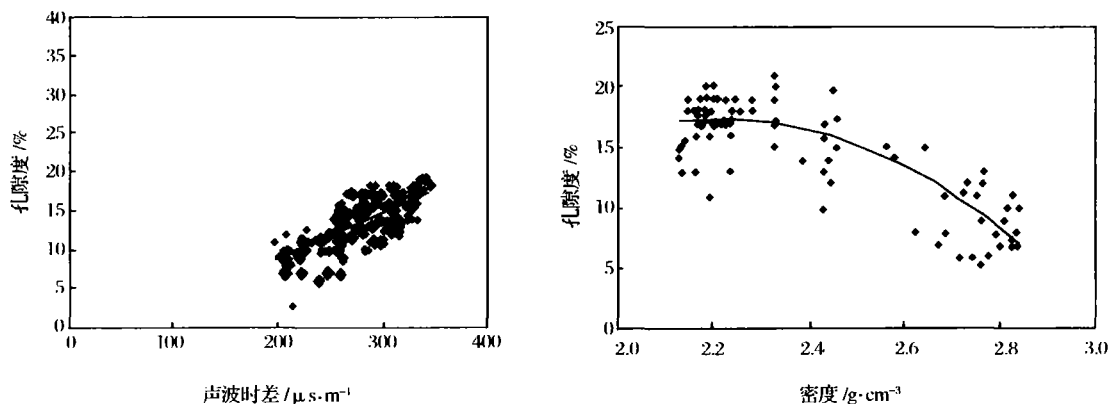


图 6 孔隙度与声波时差、密度的相关性

Fig 6 The correlation between porosity and t , DEN

表 4 部分样本数据对比

Table 4 The comparison between test and prediction

井别	深度 /m	计算孔隙度 /%	岩芯分析孔隙度 /%	相对误差 /%
A 井	2132.25	9.83	11.46	16.5
	2148.75	6.38	5.76	9.7
	3026.375	5.86	4.22	27.9
B 井	1848.40	12.32	10.70	13.1
	2033.875	9.73	9.05	6.9
	2018.75	3.48	5.39	5.4

层砂体的空间展布、沉积及成岩特征,对高邮凹陷地区阜三段储层次生孔隙有利区带进行了预测评价。根据预测结果,阜三段沙埕南—富民北一带(包括沙埕南深层、富民深层以及花庄一带)存在南北双向物源供给,砂体相对发育,是近期勘探的首选区带。

5 结束语

(1) 利用测井资料评价次生孔隙是对储层储集物性研究的有益补充,在资料齐全情况下,将测井方法与地质、地震及录井等资料综合分析,这样能够提高解释的准确度。

(2) 影响测井资料质量的因素很多,断层、裂缝、不整合面、井径变化、薄层、地层水矿化度、泥浆性质及泥浆侵入等都可能引起声波时差、电阻率及自然伽马能谱等曲线的异常,所以本文在利用测井资料之前首先进行了影响因素的校正。将未经处理的测井资料直接使用是不可靠的。

(3) 限于该区成像测井资料的缺乏,文章没有对成像测井进行阐述。利用成像测井技术(声成像、电成像等)可以直观地观察次生孔隙类型(裂缝、粒间溶孔、粒内溶孔等)。如果次生孔隙以裂缝为主,可以采用中子或密度孔隙度(总孔隙度)减去声波孔隙

度(原生孔隙度)来求取次生孔隙度;但该方法不适用于求取非裂缝次生孔隙发育(粒间溶孔等)的地层。

参考文献 (References)

- 李义军. 浅述次生孔隙的成因. 西北地质, 2002, 35 (1): 65 ~ 69 [Li Yijun. The discussion about the genesis of secondary porosity. Northwestem Geology, 2002, 35 (1): 65 ~ 69]
- 张以明. 冀中饶阳凹陷下第三系沙河街组第三段砂岩次生孔隙形成机制. 石油与天然气地质, 1994, 15 (3): 208 ~ 215 [Zhang Yiming. Secondary pore formation mechanism of the third member of Shahejie Formation, Raoyang depression. Oil & Gas Geology, 1994, 15 (3): 208 ~ 215]
- 王正允, 王方平, 林小云, 等. 塔北三叠、侏罗统孔隙类型及次生孔隙的成因. 石油与天然气地质, 1995, 16 (3): 203 ~ 210 [Wang Zhengyun, Wang Fangping, Lin Xiaoyun, et al. Pore types and origin of secondary pores of Triassic and Jurassic in North Tarim basin. Oil & Gas Geology, 1995, 16 (3): 203 ~ 210]
- 李捷, 王海云. 东北晚中生代短陷盆地储层次生孔隙形成机制. 沉积学报, 1999, 17 (4): 591 ~ 595 [Li Jie, Wang Haiyun. The development mechanism of the secondary pores in the reservoirs of the down-faulted basins of the Late Mesozoic era in the northeast China. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17 (4): 591 ~ 595]
- 李忠, 李惠生, 等. 东濮凹陷深部次生孔隙成因与储层演化研究. 地质科学, 1994, 29 (3): 267 ~ 274 [Li Zhong, Li Huiheng, et al. An approach to genesis and evaluation of secondary porosity in deeply buried sandstone reservoirs, Dongpu depression. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29 (3): 267 ~ 274]
- 刘林玉. 吐鲁番—哈密盆地中生界砂岩次生孔隙研究. 石油实验地质, 1996, 18 (3): 317 ~ 324 [Liu Linyu. A study on secondary pores of the Mesozoic sandstones in the Tupan-hami Basin. Petroleum Geology & Experiment, 1994, 29 (3): 267 ~ 274]
- 刘林玉, 陈刚, 柳益群, 等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析. 沉积学报, 1998, 16 (2): 97 ~ 101 [Liu Linyu, Cheng Gang, Liu Yiqun, et al. Analysis on influencing factors of solution-type

- secondary pore-evolution in clastic reservoirs *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(2): 97 ~ 101]
- 8 张琴, 钟大康, 朱筱敏, 等. 东营凹陷下第三系碎屑岩储层孔隙演化与次生孔隙成因. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 281 ~ 285 [Zhang Qin, Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, *et al* Pore evolution and genesis of secondary pores in Paleogene clastic reservoirs in Dongying Sag *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 281 ~ 285]
 - 9 刘爱永, 陈刚, 刘林玉, 等. 吐哈盆地三叠系砂岩的孔隙类型及次生孔隙形成机理探讨. *石油实验地质*, 2002, 24(4): 345 ~ 353 [Liu Aiyong, Chen Gang, Liu Linyu, *et al* Discussion on the pore types of the Triassic sandstone in the Tupan-Hani basin and the formation mechanism of secondary pores *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(4): 345 ~ 353]
 - 10 钟大康, 朱筱敏, 蔡进功, 等. 沾化凹陷下第三系次生孔隙纵向分布规律. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 286 ~ 290 [Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Cai Jingong, *et al* Vertical distribution of secondary pores in paleogene sandstones of Zhanhua depression *Oil & Gas Geology* 2003, 24(3): 286 ~ 290]
 - 11 洪有密. 测井原理与综合解释. 山东东营: 石油大学出版社, 2002 [Hong Youmi *The Principle of Logging and Interpretation Shandong Dongying: Petroleum University Press*, 2002]
 - 12 操应长, 姜在兴, 夏斌, 等. 声波时差测井资料识别层序地层单元界面的方法、原理及实例. *沉积学报*, 2003, 21(2): 318 ~ 322 [Cao Yingchang, Jiang Zaixing, Xia Bin, *et al* Method, principle and example and identifying sequence stratigraphical boundary using sonic logging *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 318 ~ 322]
 - 13 张小莉, 沈英, 陈文学. 利用测井资料分析成岩作用对储集层的影响. *沉积学报*, 2000, 18(3): 127 ~ 131 [Zhang Xiaoli, Shen Ying, Chen Wenxue Application of well logging information to analysis on the effect of diagenesis in reservoirs *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 127 ~ 131]
 - 14 孙建孟, 李召成, 关睢, 等. 用测井确定储层敏感性. *石油学报*, 1999, 20(4): 34 ~ 38 [Sun Jianmeng, Li Zhaocheng, Guan Ju, *et al* Reservoir sensitivity determination by well logging *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(4): 34 ~ 38]
 - 15 张振城, 孙建孟. 自然伽马能谱测井在储层敏感性预测中的应用. *钻井液与完井液*, 2003, 20(6): 26 ~ 29 [Zhang Zhencheng, Sun Jianmeng Prediction of formation sensitivity with natural gamma ray spectrometry log used in Dagang oilfield *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2003, 20(6): 26 ~ 29]
 - 16 苗建宇, 祝总祺, 刘文荣, 等. 济阳凹陷下第三系温度、压力与深部储层次生孔隙关系. *石油学报*, 2000, 21(3): 36 ~ 40 [Miao Jianyu, Zhu Zongqi, Liu Wenrong, *et al* Relationship between temperature-pressure and secondary pores of deep reservoir in Eogene at Jiyang depression *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(3): 36 ~ 40]
 - 17 张立鹏, 边瑞雪, 杨双彦, 等. 用测井资料识别烃源岩. *测井技术*, 2001, 25(2): 146 ~ 152 [Zhang Lipeng, Bian Ruixue, Yang Shuangyan, *et al* Identifying hydrocarbon source rock with log data *Well Log Technology*, 2001, 25(2): 146 ~ 152]
 - 18 祝总祺, 苗建宇, 刘文荣, 等. 论压力封存箱及其对次生孔隙的保护作用. *西北大学学报(自然科学版)*, 1997, 27(1): 73 ~ 77 [Zhu Zongqi, Miao Jianyu, Liu Wenrong, *et al* The pressured fluid compartment and its preservation to secondary pores *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 1997, 27(1): 73 ~ 77]
 - 19 王越之. 地层压力研究方法新进展. *中国海上油气(地质)*, 1998, 12(3): 210 ~ 212 [Wang Yuezhi The recent development of research methods in formation-pressure *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1998, 12(3): 210 ~ 212]
 - 20 邵新军, 许韵, 吕中锋, 等. 地层流体压力预测方法的讨论. *石油勘探与开发*, 2000, 27(3): 100 ~ 102 [Shao Xinjun, Xu Jun, Lv Zhongfeng, *et al* A discussion about methods for predicting pore pressure *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 100 ~ 102]

Application of Well Logging Information to Secondary Porosity Analysis

ZHANG Zhen-cheng¹ SUN Jian-meng¹ SHI Zhen-fei^{1,2}
CAI Xiaoming² SU Yuan-da¹ LIAO Dong-liang¹

1(University of Petroleum, Dongying Shandong 257061) 2(Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou Jiangsu 225265)

Abstract Based on analysis of geological, seismic and experimental analysis in Gaoyou depression, the article analyses the original mechanism of secondary porosity. The result indicates that the analysis of secondary porosity with well logging is available. The methods include: 1) the original stage of secondary porosity can be distinguished by sonic data; 2) The secondary porosity can be collected by density porosity and neutron porosity subtracting sonic porosity. The article analyses the qualification of the method; 3) The decomposition of organic matter may bring organic acid that can produce a lot of secondary porosity. The organic matter in source rocks can be measured by sonic and resistivity data; 4) the abnormal high pressure can be obtained by sonic data from which the formation and preservation of secondary porosity are analyzed. The above methods are tested in Gaoyou depression.

Key words well logging, secondary porosity, clay minerals, organic acid, abnormal pressure