

· 测井技术应用 ·

# 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

毛志强\*<sup>①②</sup> 张冲<sup>①②</sup> 肖亮<sup>①②</sup>

①油气资源与探测国家重点实验室·中国石油大学(北京),北京 102249;

②地球探测与信息技术北京市重点实验室,北京 102249)

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. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1):105~109

**摘要** 川中地区须家河组发育大量的低孔低渗气藏,岩心分析结果表明,储层孔隙度为4%~8%,渗透率为0.1~1mD。对于这类低孔低渗气层,准确地计算储层孔隙度显得尤为重要。考虑到储层含气的影响,利用单一测井资料难以准确地计算储层孔隙度,本文从核磁共振测井基本原理和基于声波时差测井的岩石体积物理模型分析出发,提出了一种新的结合声波时差—核磁共振测井资料计算低孔低渗气层真实孔隙度的方法。实际应用表明,利用该方法计算的孔隙度与岩心分析结果吻合较好,计算结果可以真实地反映实际地层孔隙度。

**关键词** 低孔低渗气藏 声波时差 核磁共振测井 含气校正 体积物理模型

## 1 引言

为了提高低孔低渗气藏的勘探开发效率,准确地求取储层孔隙度显得尤为重要<sup>[1]</sup>。以往用来计算储层孔隙度的常规测井序列有密度、声波时差和中子测井。由于密度测井采用贴井壁的测量方式,其测量结果受井眼条件的影响较大,因此在井眼条件较差的情况下,往往采用声波时差测井资料计算地层孔隙度。但是,当储层含有气体时,利用声波时差求取的孔隙度往往偏高。现在通常采用核磁共振(NMR)测井获取地层孔隙度信息。当储层含有气体时,会引起地层含氢指数降低,导致核磁测井求取的孔隙度偏低<sup>[2]</sup>。由此可见,对于低孔低渗气藏而言,利用单一的孔隙度测井资料难以准确地计算储层孔隙度。基于此,笔者提出了结合声波时差—核磁共振测井资料计算低孔低渗气藏孔隙度的方法,并将其应用于川中地区须家河组低孔低渗气藏以计算地层的真实孔隙度。

## 2 含气储层孔隙度计算方法

### 2.1 基于核磁共振测井的储层孔隙度计算方法

根据核磁共振测井的基本原理,利用核磁共振测井资料计算含气储层孔隙度的公式为<sup>[3~5]</sup>

$$\text{CMRP} = \phi \times S_g \times \text{HI}_g \times P_g + \phi \times \text{HI}_f \times (1 - S_g) \quad (1)$$

其中

$$P_g = 1 - e^{-\frac{T_w}{T_{1g}}}$$

式中: $\phi$ 为地层真实孔隙度; $S_g$ 为含气饱和度; $\text{HI}_g$ 为气体的含氢指数, $\text{HI}_f$ 为孔隙流体含氢指数; $P_g$ 为气体的极化因子; $T_w$ 为等待时间; $T_{1g}$ 为气体纵向弛豫时间。

如果储层孔隙流体为地层水,即 $\text{HI}_f = 1.0$ ,则式(1)可转化为

$$\text{CMRP} = \phi \times [1 - S_g \times (1 - \text{HI}_g \times P_g)] \quad (2)$$

即

$$\frac{\text{CMRP}}{\phi} = 1 - S_g \times (1 - \text{HI}_g \times P_g) \quad (3)$$

\*北京市昌平区府学路18号中国石油大学资源与信息学院测井研究中心,102249

本文于2009年4月23日收到,修改稿于同年6月23日收到。

基金项目:中国石油应用基础研究项目(XNS14JS20052307)。

对式(3)进行分析发现,要利用核磁共振测井资料准确地反映地层真实孔隙度  $\phi$ , 必须首先确定出地层含气饱和度  $S_g$ 、气体的含氢指数  $HI_g$  以及气体的极化因子  $P_g$ 。而  $S_g$  的值主要依据阿尔奇公式计算, 但要利用阿尔奇公式计算地层含气饱和度  $S_g$ , 必须首先获取地层的真实孔隙度  $\phi$ 。由此可见, 利用单一核磁共振测井资料难以准确地反映地层的真实孔隙度值, 且计算过程较困难。

## 2.2 基于声波时差测井的储层孔隙度计算方法

依据纯砂岩气层的岩石体积物理模型, 其声波时差测井的响应方程为<sup>[6]</sup>

$$\Delta t = \Delta t_{ma} \times (1 - \phi) + \Delta t_w \times \phi \times (1 - S_g) + \Delta t_g \times \phi \times S_g \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为声波时差测井值;  $\Delta t_{ma}$  为岩石骨架声波时差, 对于砂泥岩地层而言,  $\Delta t_{ma}$  一般取  $55.5 \mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $\Delta t_w$  为地层水声波时差, 一般取  $189 \mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $\Delta t_g$  为气体的声波时差。

目前, 利用声波时差测井资料计算储层孔隙度的威利公式为<sup>[7]</sup>

$$\text{PHIS} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (5)$$

式中: PHIS 为声波时差孔隙度;  $\Delta t_f$  为孔隙流体声波时差。

将式(4)代入式(5), 得

$$\text{PHIS} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} = \phi \left[ 1 + S_g \left( \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right) \right] \quad (6)$$

即

$$\frac{\text{PHIS}}{\phi} = \left[ 1 + S_g \left( \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right) \right]$$

由式(6)可知, 要利用声波时差测井资料准确地计算地层的真实孔隙度, 必须首先确定地层的含气饱和度  $S_g$ 、孔隙流体声波时差  $\Delta t_f$ , 而其值的求取又依赖于地层的真实孔隙度值。由此可见, 采用单一的声波时差测井资料也难以准确地计算出地层的真实孔隙度。

## 2.3 联合声波时差—核磁共振测井计算孔隙度的方法

假设存在两个参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 并令

$$\alpha = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}, \beta = 1 - HI_g \times P_g$$

将其分别代入式(6)和式(3), 得

$$\frac{\text{CMRP}}{\phi} = 1 - \beta \times S_g \quad (7)$$

$$\frac{\text{PHIS}}{\phi} = 1 + \alpha \times S_g \quad (8)$$

联立式(7)和式(8)并进行化简, 得到地层真实孔隙度的计算公式为

$$\phi = \left( \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right) \times \text{PHIS} + \left( \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right) \times \text{CMRP} \quad (9)$$

如果令  $m = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ ,  $n = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$ , 则式(9)可表示为

$$\phi = m \times \text{PHIS} + n \times \text{CMRP} \quad (10)$$

式中  $m + n = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = 1$ 。

通过对式(10)进行分析可知, 在确定出  $m$  和  $n$  的值后, 就可以结合利用声波时差计算的孔隙度和核磁共振测井孔隙度计算出地层的真实孔隙度值<sup>[8~14]</sup>。该方法的主要优势在于避免了利用单一方法计算孔隙度时首先要获取地层含气饱和度、含氢指数以及极化因子等参数的问题。

## 3 实际资料处理

川中地区须家河组发育有大量的低孔低渗气藏, 通过该区岩心分析资料(图1、图2)表明, 该区的储层孔隙度为  $4\% \sim 8\%$ , 渗透率为  $0.1 \sim 1 \text{mD}$ 。对于该类储层, 其地层真实孔隙度的准确计算显得尤为重要。在该区的4口探井中, 主要的孔隙度测井序列包括密度、中子和声波时差测井, 在其中的两口井中获取了 MRIL-C 型核磁共振测井资料, 一口井中获取了斯伦贝谢的 CMR 型核磁共振测井资料。由于在4口探井中井眼垮塌比较严重, 导致在利用密度—中子交会图法计算储层孔隙度之前, 必须先对密度测井曲线进行井眼校正, 这将增加解释人员的工作量。由于声波时差测井采用居中测量的方式, 受井眼的影响较小, 因此本文所述主要采用声波时差测井资料来计算储层孔隙度。图3为基于声波时差测井资料的基础上, 利用经典的威利公式计算的储层孔隙度、核磁共振测井孔隙度与岩心分析孔隙度之间的对比结果。从图3可以看到, 对于声波时差测井而言, 由其计算的孔隙度明显大于岩心分析的孔隙度。由于储层含气的影响, 导致核磁共振测井孔隙度小于岩心分析孔隙度, 可见利用单一测井资料难以准确地反映地层真实孔隙度。因此, 为了准确地确定地层的真实孔隙度,

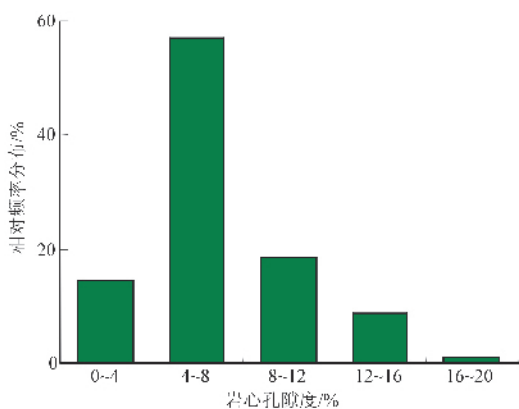


图 1 川中地区须家河组岩心孔隙度统计直方图

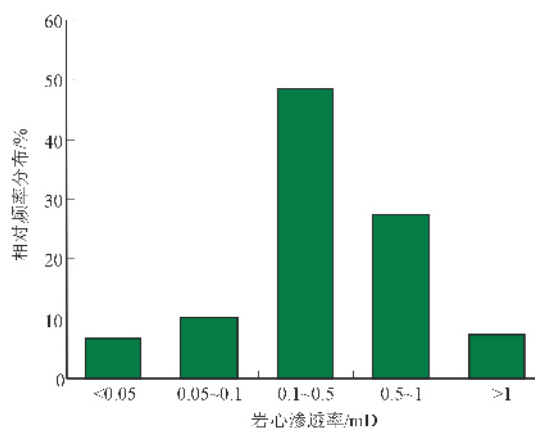


图 2 川中地区须家河组岩心渗透率统计直方图

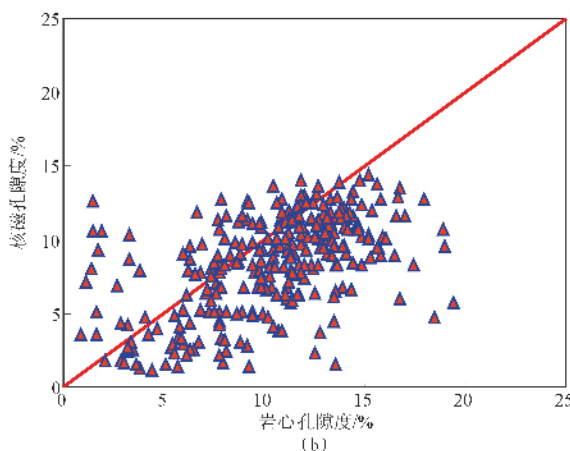
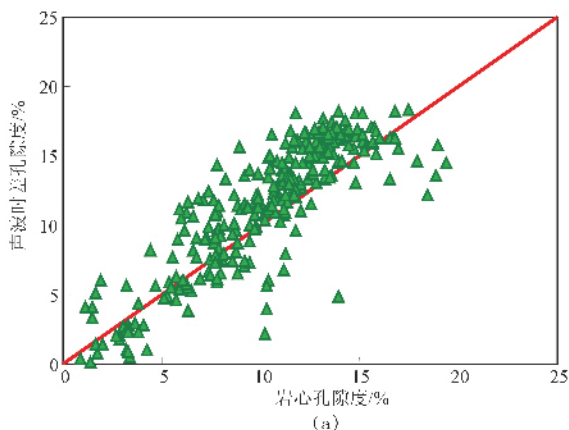


图 3 声波孔隙度、核磁孔隙度与岩心分析孔隙度对比图

(a)岩心孔隙度与声波孔隙度对比结果;(b)岩心孔隙度与核磁孔隙度对比结果

开展了结合声波时差—核磁共振测井资料计算储层孔隙度的方法研究。

对于该类低孔低渗气藏而言,可以认为岩心孔隙度等于地层的真实孔隙度,因此将其代入式(10),左右两边同除以 CMRP,得

$$\frac{CPOR}{CMRP} = m \times \frac{PHIS}{CMRP} \times n \quad (11)$$

式中 CPOR 为岩心孔隙度。

如果以  $\frac{PHIS}{CMRP}$  为横坐标,  $\frac{CPOR}{CMRP}$  为纵坐标作图,进行线性趋势回归分析,即可以得到参数  $m$  和  $n$  的值。通过对须家河组实际测井资料的处理,得到  $\frac{PHIS}{CMRP}$  和  $\frac{CPOR}{CMRP}$  之间的对应关系如图 4 所示。据此,可以得到须家河组低孔低渗气藏的孔隙度计算公式为

$$\phi = 0.44 \times PHIS + 0.56 \times CMRP \quad (12)$$

其相关程度可达 0.85。利用式(12)就可以在利用威利公式确定出地层的声波时差孔隙度和核磁共振

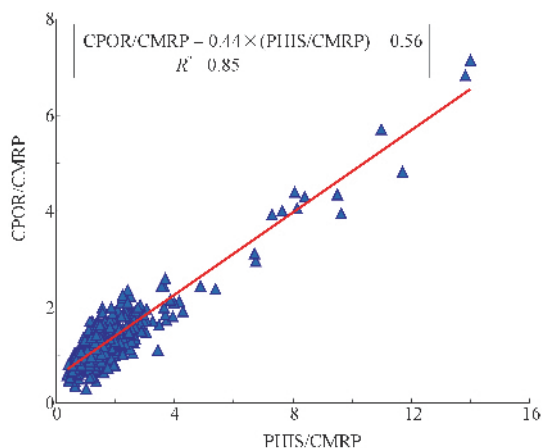


图 4 参数  $m$  和  $n$  值确定方法

测井孔隙度后计算出地层的真实孔隙度。

## 4 应用效果评价

利用本文所述方法对川中地区 A 井中须家河组低孔低渗气层进行了实际资料处理,计算的地层

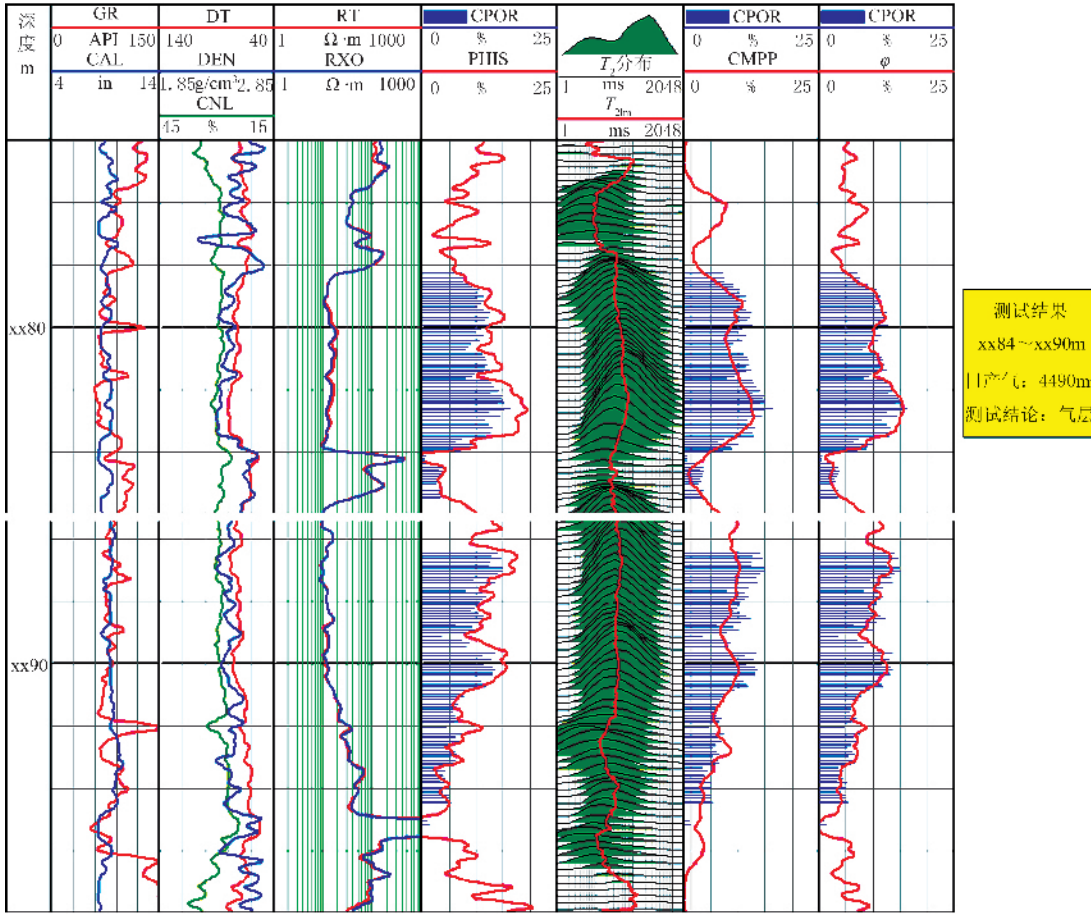


图5 川中地区 A 井须家河组低孔低渗气层孔隙度计算结果及对比图

真实孔隙度与岩心孔隙度之间的对比结果如图 5 所示。图 5 中第 5 栏为利用声波时差计算的孔隙度 (PHIS) 与岩心分析孔隙度 (CPOR) 之间的对比, 从图中可以看到, 测试结果为气层的 xx84~xx90m 层段, 利用声波时差计算的孔隙度明显大于岩心孔隙度, 分析原因在于储层孔隙空间中气体的存在引起声波时差增大, 导致利用威利公式计算的孔隙度大于地层的真实孔隙度。图 5 中第 6 栏为核磁共振测井  $T_2$  分布图,  $T_{2m}$  为核磁共振测井  $T_2$  几何平均值。图 5 中第 7 栏为核磁共振测井孔隙度 (CMPP) 与岩心分析孔隙度之间的对比, 从图上可以清楚地看到, 由于储层含气的影响, 导致核磁共振测井孔隙度明显略低于岩心分析的孔隙度; 图 5 中第 8 栏为利用本文所述方法计算的地层孔隙度与岩心分析孔隙度之间的对比, 从二者的对比结果可以看到, 利用本文所述方法计算的储层孔隙度与岩心孔隙度之间吻合较好, 能够较真实地反映地层的孔隙度。

图 6 为川中地区 B 井岩心孔隙度与测井计算孔隙度对比交会图。图中红色线为坐标系的  $45^\circ$  线, 落在此线上的点表示岩心分析孔隙度与测井计算孔隙度相等, 粉红色线为孔隙度介于  $\pm 1.5\%$  的误差线。从图上可以看到, 利用本文提出方法计算的孔隙度与岩心孔隙度基本落在  $\pm 1.5\%$  的误差

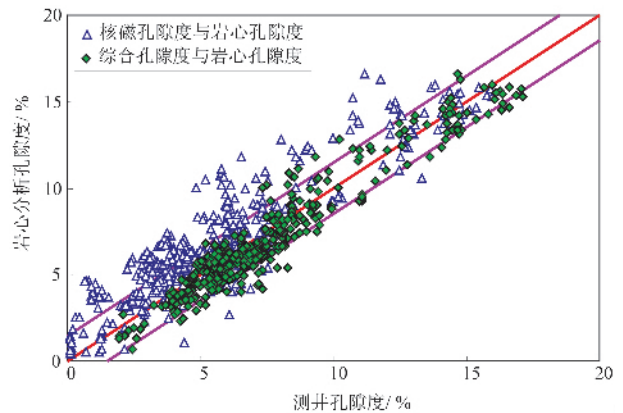


图6 川中地区 B 井岩心孔隙度与测井计算孔隙度交会图

范围内,而核磁共振测井孔隙度明显小于岩心分析孔隙度。由此再次证实,基于本文提出方法计算的储层孔隙度能够满足低孔低渗气藏储层评价和储量计算的需求,较准确地反映了实际地层的真实孔隙度。

## 5 结论

(1) 当储层含气时,利用声波时差计算的孔隙度偏大,利用核磁共振测井计算的孔隙度偏小,因此利用单一的测井资料难以准确地计算低孔低渗气藏的真实孔隙度;

(2) 利用本文提出的结合声波时差—核磁共振测井资料计算低孔低渗气藏孔隙度的方法,可以在不需要获取储层含气饱和度等参数的基础上准确地计算气层的真实孔隙度;

(3) 通过对川中地区 A 井和 B 井须家河组低孔低渗气层的实际资料的处理,证实本文提出方法在计算孔隙度方面能消除储层孔隙空间含气对计算结果的影响,计算的孔隙度与岩心分析结果吻合较好,且其误差范围满足实际低孔低渗气藏储层评价和储量计算要求,能够真实地反映储层的孔隙度。

### 参 考 文 献

- [1] 肖亮,刘晓鹏,毛志强. 结合 NMR 和毛管压力资料计算储层渗透率的方法. 石油学报, 2009, 30(1): 100~103
- [2] 肖亮. 测井资料在天然气识别中的应用. 新疆石油天然气, 2007, 3(2): 12~16, 39
- [3] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用. 北京: 科学出版社, 1998, 35~62
- [4] 石油测井情报协作组编. 测井新技术应用. 北京: 石油工业出版社, 1998, 122~150
- [5] Coates G R, Xiao L Z, Primmer M G. *NMR Logging principles and Applications*. Houston: Gulf Publishing Company, 2000, 42~78
- [6] 雍世和,张超谟,刘子云等著. 测井数据处理与综合解释. 山东东营: 中国石油大学出版社, 1996, 153~261
- [7] 楚泽涵,高杰,黄隆基等编. 地球物理测井原理及方法(下册). 北京: 石油工业出版社, 2007, 224~326
- [8] Hamada G M, Oraby M E. Integration of NMR with other open hole logs for improved porosity, permeability and capillary pressure of gas sand reservoirs. *SPE* 119064, 2007
- [9] Hamada G M, AbuShanab M A. Petrophysical properties evaluation of tight gas sand reservoir using NMR and conventional openhole logs. *SPE* 114254, 2008
- [10] Hamada G M, AbuShanab M A. Better porosity estimate of gas sandstone reservoir using density and NMR logging data. *SPE* 106627, 2007
- [11] AbuShanab M A, Hamada G M, Oraby M E. DMR technique improves tight gas sand porosity estimate. *Oil&Gas Journal*, 2005, 103(47): 54~59
- [12] AbuShanab M M, Hamada G M, Oraby M E and Abdelwally A A. Improved porosity estimation in tight gas reservoirs from NMR and density logs. *Emirates Journal for Engineering Research*, 2005, 10(2): 9~13
- [13] 肖亮译. 利用 NMR 和密度测井改进致密气层孔隙度评价. 测井与射孔, 2007, 10(2): 8~10
- [14] Hamada G M, AbuShanab M A. Better porosity estimate of gas sandstone reservoirs using density and NMR logging data. *Emirates Journal for Engineering Research*, 2008, 13(3): 47~54

(本文编辑:张亚中)