

· 测井技术应用 ·

利用核磁共振(NMR)测井资料评价储层 孔隙结构方法的对比研究

刘卫*^① 肖忠祥^② 杨思玉^③ 王友净^③(①中国石油大学地球资源与信息学院,山东东营 257061; ②西安石油大学
油气资源学院,西安 710065; ③中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

刘卫,肖忠祥,杨思玉,王友净.利用核磁共振(NMR)测井资料评价储层孔隙结构方法的对比研究.石油地球物理勘探,2009,44(6):773~778

摘要 文中介绍了四种利用核磁共振测井 T_2 弛豫时间分布定量评价储层孔隙结构的方法,结合胜利油田 A 井实际资料的处理,对各种方法的适用性进行了对比分析。结果表明,三孔隙度组分百分比法、相似对比法和平均饱和度误差最小值法没有考虑储层孔隙含烃对 T_2 谱形态特征的影响。三孔隙度组分百分比法适用于孔隙结构较好或较差的储层和水层中评价储层孔隙结构,而对于孔隙结构中等的储层则失去其作用;相似对比法和平均饱和度误差最小值法只能用于水层中构造核磁毛管压力曲线以评价储层孔隙结构;而基于 Swanson 参数的核磁毛管压力曲线构造方法采用实际测量的核磁共振测井资料,适用于各种不同类型的储集层中评价储层孔隙结构。通过与岩心资料对比,其结果的可靠性得到验证,具有一定的推广应用价值。

关键词 核磁共振测井 孔隙结构 核磁毛管压力曲线 对比分析 适用性

1 引言

随着石油需求量的不断增加,迫切地要求地质学家们增加对复杂储层(尤其是低孔隙度、低渗透率储层)勘探程度的了解^[1]。然而,如何降低对这类复杂储层勘探的风险,节约勘探成本,提高勘探结果的准确率,始终是石油勘探领域所面对的难题。对于这类复杂储层,只有准确了解了储层的孔隙结构特征,才能制定出合理的勘探开发方案和增产酸压措施,指导开发生产。自核磁共振测井(NMR)技术诞生以来,因其独特优势给地质学家解决这类复杂储层的评价问题提供了全新思路,尤其是对复杂储层孔隙结构的评价更是发挥了常规测井方法所不具备的优势^[2,3]。通过对获取的核磁共振测井回波串进行多指数反演,可得到核磁共振测井 T_2 弛豫时间分布谱;利用 T_2 谱能够定性评价储层孔隙结构。对于孔隙结构较好的储层, T_2 分布中大孔隙组分占主要优势,谱的位置在 T_2 弛豫时间轴上相对靠右,

表现为双峰分布特征;而对于孔隙结构较差的储层, T_2 分布中小孔隙组分占优势,谱的位置在 T_2 弛豫时间轴上相对靠左,弛豫时间较短。然而,该方法只是一种定性评价储层孔隙结构的方法,达不到定量评价的目的。本文主要介绍了四种国内外目前常用的利用核磁共振测井资料定量评价储层孔隙结构的方法,并结合实际资料,对比分析了各种方法的适用性。

2 三孔隙度组分百分比法

Liu 和 Zhou 等^[4,5]于 2007 年提出了利用“三孔隙度组分百分比法”来评价储层的孔隙结构,该方法提出控制岩石孔隙结构的关键因素是整个孔隙系统中在一定的孔隙大小范围内的孔隙度组分百分比。基于此,提出了利用 NMR 测井资料评价储集层孔隙结构的新思路:从 NMR T_2 分布谱中提取 3 个参数 S_1 、 S_2 和 S_3 ,分别代表 T_2 弛豫时间介于 1~10ms、10~100ms、100~1000ms 范围内的三种孔隙

* 山东省东营市中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,257061
本文于 2009 年 3 月 19 日收到,修改稿于同年 6 月 19 日收到。
本课题由国家重点基础研究发展计划“973”专题(2006CB705801)资助。

度组分百分比。将 S_3 大于 S_1 和 S_2 的储集层定义为第一类储集层,赋予孔隙结构质量评价参数“PORCLA”等于 1000;将 S_2 大于 S_1 和 S_3 并且 S_3 大于 S_1 的储集层定义为第二类储集层,赋予孔隙结构质量评价参数“PORCLA”等于 100;将 S_2 大于 S_1 和 S_3 并且 S_1 大于 S_3 的储集层定义为第三类储集层,赋予孔隙结构质量评价参数“PORCLA”等于 10;将 S_1 大于 S_2 和 S_3 的储集层定义为第四类储集层,赋予孔隙结构质量评价参数“PORCLA”等于 1。也就是说,只要根据“PORCLA”参数的大小即可直观判断储集层的孔隙结构。通过对实际资料的深入分析认为,该方法相对于定性的、通过观察 T_2 谱的形态评价储层孔隙结构而言具有一定的改进作用,可以达到根据“PORCLA”参数的大小定量评价储集层的孔隙结构并指示含油气潜力储层。Mao Zhi-qiang 和肖亮等^[6,7]通过对不同类型的岩心样品在不同饱和水状态下的核磁共振实验分析,认为当储层孔隙结构较好时,岩石大孔隙组分占主要优势,其核磁共振 T_2 分布谱甚至会呈现双峰分布特征。而且当储层孔隙中含有非润湿相的烃时, T_2 谱中第二个峰的形态主要反映了烃的体积弛豫特征,此时,饱和水状态下的 T_2 分布谱和部分饱和烃状态下的 T_2 谱的形态比较接近。当储层孔隙结构较差时,由于岩石的毛细力较大,非润湿相的烃无法克服毛细力而进入孔隙空间,此时的岩石核磁共振 T_2 分布谱完全反映的是储层饱和水状态下的形态特征。通过对实际资料的处理认为,在这两种状态下,可以利用三孔隙度组分百分比法评价储层的孔隙结构。但是当储层孔隙结构中等时,部分非润湿相的烃会进入到储层孔隙空间而驱赶掉部分的孔隙水。此时的 T_2 谱的形态是烃和水共同支配的结果,在 T_2 谱上会导致弛豫时间较长的谱的位置向右移动,此时利用三孔隙度组分百分比法就会夸大实际储层的特征^[7]。

3 利用核磁毛管压力曲线评价储层孔隙结构

对于评价储层孔隙结构最直接有效的资料就是压汞毛管压力曲线^[7~9]。通过对压汞毛管压力曲线形态特征的分析,可以提取储层孔喉半径分布谱、储层平均孔喉半径、最大孔喉半径、排驱压力、启动压

力等孔隙结构参数,通过对这些参数的分析,就可以了解储层的孔隙连通性,对储层进行分类,优选出有利储层。因此,压汞毛管压力曲线成为地质学家们进行复杂储层勘探过程中了解孔隙结构必不可少的资料。然而,由于压汞实验必须要有岩心取样,而且在进行压汞实验的过程中所采用的介质为有毒的汞,对岩心具有永久破坏作用。因此不可能在整个井段进行连续取样分析,而只能针对主要目的层段选取有限的岩心样品进行压汞实验,获取的数据为离散数据,不能实现对整个储层孔隙结构进行连续评价的目的。核磁共振测井资料具有连续分布的特点,而且在一定程度上能评价储层的孔隙结构。因此,为了实现利用毛管压力曲线连续评价储层孔隙结构的目的,最有效的方法就是利用核磁共振测井连续构造出毛管压力曲线。笔者在此文中将利用核磁共振测井资料构造的毛管压力曲线称之为“核磁毛管压力曲线”。下面主要介绍三种核磁毛管压力曲线的构造方法并对其适用性进行分析。

3.1 理论基础

依据核磁共振测井基本原理,对于水润湿相岩石而言,当磁场很均匀、扩散系数不大且假设岩石孔隙具有规则几何形状的情况下,其 T_2 横向弛豫时间可表示为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} = F_s \frac{\rho_2}{r_{\text{por}}} \quad (1)$$

式中: T_2 为岩石横向弛豫时间(ms); ρ_2 为岩石的表面弛豫率($\mu\text{m}/\text{ms}$); S 为岩石孔隙表面积(μm^2); V 为岩石孔隙体积(μm^3); r_{por} 为孔隙半径(μm); F_s 称为孔隙几何形状因子(对于球状孔隙 $F_s=3$,对柱状管道孔隙 $F_s=2$)。

根据毛管压力理论,如果假设岩石孔隙半径与孔喉半径之间成比例或具有一定的相关关系,则进汞压力 P_c 与核磁共振测井 T_2 弛豫时间之间具有如下相关关系

$$P_c = C \times \frac{1}{T_2} \quad (2)$$

式中: P_c 为进汞压力(MPa); C 为核磁共振测井 T_2 弛豫时间与毛管压力之间的转换系数。由此可知,在确定出转换系数 C 的数值后,就可以利用式(2)所示的相关关系将核磁共振 T_2 分布转化为连续分布的核磁毛管压力曲线以评价储层的孔隙结构。

3.2 核磁毛管压力曲线构造方法

对于核磁毛管压力曲线构造方法的研究,实际

上就是找出式(2)中毛管压力 P_c 与 T_2 弛豫时间之间的转换刻度函数 C 的值。目前对于函数 C 的确定方法主要包括:①相似类比法;②平均饱和度误差最小值法^[10~12]。

3.2.1 相似对比法

相似对比法的基本思想是首先假定一个 C , 将 $C/T_2 \sim \text{Amp}(T_2 \text{ 谱的幅度})$ 与 $P_c \sim S_{\text{Hg}}(i)$ (进汞饱和度增量)重合在一张图上。结果表明,当 C 增大时, $C/T_2 \sim \text{Amp}$ 向 $P_c \sim S_{\text{Hg}}(i)$ 的右方偏移;当 C 减小时, $C/T_2 \sim \text{Amp}$ 向 $P_c \sim S_{\text{Hg}}(i)$ 的左方偏移。选择大小合适的两个 C 值,使 $C/T_2 \sim \text{Amp}$ 分别位于 $P_c \sim S_{\text{Hg}}(i)$ 右边和左边。则必存在惟一的 C , 使 $C/T_2 \sim \text{Amp}$ 与 $P_c \sim S_{\text{Hg}}(i)$ 之间的相关系数达到最大值,此时的 C 值就是 T_2 与 P_c 之间的转换刻度系数^[10]。利用此转换刻度系数就可以将核磁共振测井 T_2 分布转换为储层孔喉半径分布,然后将孔喉半径分布进行累加,即可得到连续分布的储层毛

管压力曲线。

3.2.2 平均饱和度误差最小值法

平均饱和度误差最小值法由 Shell 公司的 Yakov 提出^[11]。该方法的主要原理是首先将 T_2 谱的幅度进行归一化处理,将 T_2 谱从大孔隙部分向小孔隙部分进行反向累加,得到一条在物理意义上与压汞毛管压力曲线相似的 T_2 谱积分曲线,其累积饱和度相当于压汞毛管压力曲线的进汞饱和度,压汞毛管压力曲线与 T_2 饱和谱积分曲线反映近似相同的岩石孔隙结构特征。为了寻找一个最佳的转换系数,使转换得到的核磁毛管压力曲线与实际的压汞毛管压力曲线最接近,引入一个平均饱和度误差函数, $\langle \delta S_w \rangle(C)$ 用一定毛管压力范围内所有采样点的 P_c 值对误差进行平均处理,即

$$\langle \delta S_w \rangle(C) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{samples}}} \langle S_{\text{Hg}} - S_{\text{o,NMR}} \rangle_i(k) \quad (3)$$

其中

$$\langle S_{\text{Hg}} - S_{\text{o,NMR}} \rangle_i(C) = \sqrt{\frac{1}{P_{c,\text{high}} - P_{c,\text{low}}}} \int_{P_{c,\text{low}}}^{P_{c,\text{high}}} [S_{\text{Hg}}(P_c)_i - S_{\text{o,NMR}}(P_c = kT_2^{-1})_i] dP_c \quad (4)$$

式中: n 为 T_2 谱的布点数,对于斯伦贝谢的 CMR 测井仪器而言, n 等于 30,对于哈里伯顿的 MRIL 测井仪器而言, n 等于 12; $S_{\text{o,NMR}}$ 为核磁反向累加饱和度(%); $P_{c,\text{high}}$ 与 $P_{c,\text{low}}$ 分别对应最大和启动毛管压力(MPa)。

改变 C 值使误差函数 $\langle \delta S_w \rangle(C)$ 达到极小值,此时的 C 值即为核磁毛管压力曲线的最佳转换刻度系数。Yakov 通过对 189 块岩心样品的实验分析,最终确定出转换刻度系数 C 的最佳取值为 4^[11]。

通过分析相似对比法和平均饱和度误差最小值法不难发现,二者具有一定的相似性,即认为核磁共振测井 T_2 谱积分曲线和压汞毛管压力曲线之间的转换关系为线性转换刻度关系。而且对于所有类型的岩心样品均采用相同的线性转换刻度系数。

通过对实际资料的分析处理发现,利用线性转换刻度方法构造的核磁毛管压力曲线与压汞毛管压力曲线在大孔隙部分(低毛管压力段)吻合较好,而在小孔隙部分(高毛管压力段)则会出现分叉现象。由此确定的核磁毛管压力曲线并不能准确地反映储层小孔隙部分的孔隙结构,而小孔隙部分正好是地质学家们所关注的焦点。为了解决这一问题,Yakov

提出采用下式

$$C(P_c) = C \left[1 + \frac{4}{\left(\frac{200}{P_c} + 1 \right)^{10}} \right] \quad (5)$$

所示的可变转换刻度函数来构造核磁毛管压力曲线。然而这种转换刻度方法只是简单的数学推导,缺乏理论基础,而且该模型的一个不足之处在于所有样品的刻度都按相同的压力点分段,而不是毛管压力曲线的拐点。同时可以看到,这两种核磁毛管压力曲线构造方法的适用条件都是在岩石孔隙 100% 饱含水的情况下,当储层孔隙空间含有非润湿相烃时,会对核磁 T_2 谱的形态造成影响^[11]。

3.3 基于 Swanson 参数模型的核磁毛管压力曲线构造方法

肖忠祥和 Xiao L 等人^[13,14]为了解决线性转换刻度方法在构造核磁毛管压力曲线以评价储层孔隙结构的过程中存在的诸多问题,提出了基于 Swanson 参数模型的核磁毛管压力曲线构造方法,并建立了相应的核磁毛管压力曲线构造模型。通过对大量岩心样品的深入分析,肖忠祥等人^[15]发现,对于所有进行压汞试验的岩心样品而言,各种不同孔隙

结构类型的岩心样品均采用了相同的进汞压力。因此对应不同进汞压力下的进汞饱和度,在一定程度上可以完全反映岩心样品的孔隙结构特征,对于孔隙结构较好的岩石,在相同的进汞压力下,进入岩石孔隙空间中汞的量相对较多,相应的进汞饱和度也较大。而对于孔隙结构较差的岩石,在相同的进汞压力下,进入岩石孔隙中汞的量相对较少,相应的进汞饱和度也较小。而岩石孔隙度和渗透率是宏观反映岩石孔隙结构的参数,基于此,提出了利用岩石孔隙度、渗透率参数构造毛管压力曲线,并建立了毛管压力曲线的构造模型。利用此模型,只要在有储层孔隙度和渗透率资料的情况下,就可以利用其连续地构造出毛管压力曲线。考虑到在实际储层(尤其是低孔隙度、低渗透率储层)评价中渗透率参数求取困难的问题,提出了将离散的压汞毛管压力资料与连续的核磁共振测井资料相结合来计算储层渗透率的方法。该方法的基本步骤是:首先,从压汞毛管压

力曲线中提取 Swanson 参数,并建立 Swanson 参数与对应岩石渗透率之间的关系模型;其次,利用同时进行了压汞和核磁共振测量的样品,提取 Swanson 参数与核磁共振测井横向弛豫时间几何平均值之间的相关关系;利用此相关关系,就可以从核磁共振测井资料中提取 Swanson 参数,进而再根据 Swanson 参数与岩石渗透率之间的相关模型来计算出储层的渗透率。结合核磁共振测井总孔隙度,就可以在有核磁共振测量的井段连续地构造出核磁毛管压力曲线,利用此方法构造的核磁毛管压力曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看到,四种不同类型的岩心样品构造的毛管压力曲线与压汞毛管压力曲线之间吻合的均较好。同时,由于利用该方法构造核磁毛管压力曲线的过程中所用到的是实际测量的核磁共振测井数据,可以消除储层孔隙含烃对构造结果准确性的影响。因此,利用该方法构造的核磁毛管压力曲线具有实际应用价值。

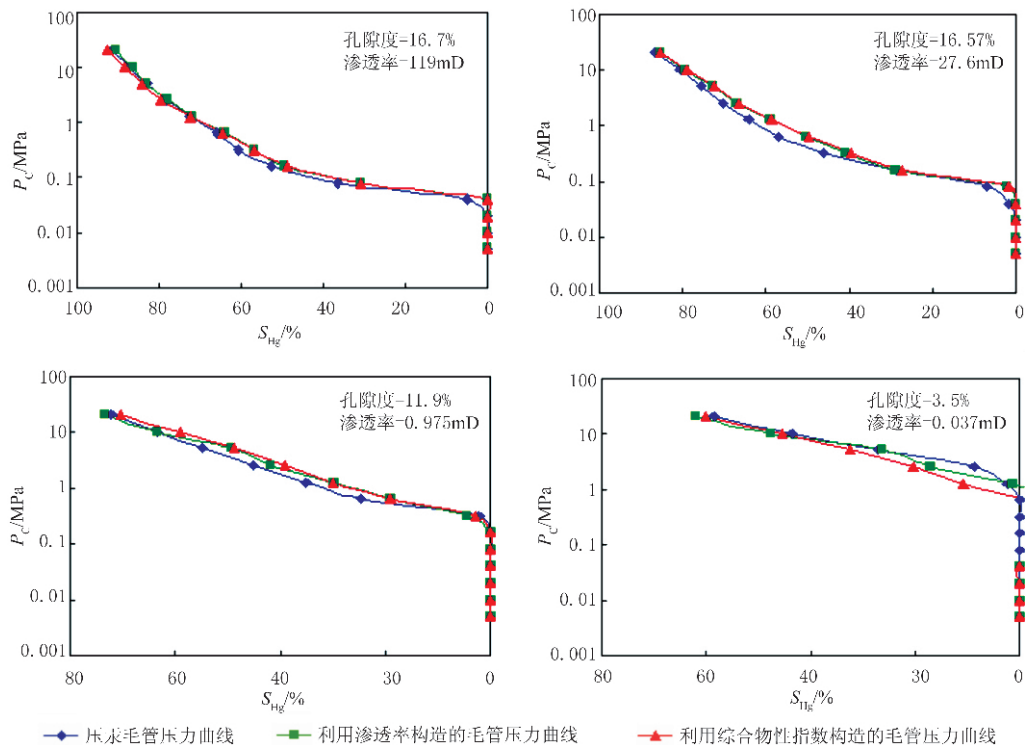


图 1 四种不同类型岩心样品构造的毛管压力曲线与实验室压汞毛管压力曲线形态对比^[9]

4 应用效果对比分析

利用上述所述线性转换刻度方法和基于 Swanson 参数的核磁毛管压力曲线构造方法,对胜利油

田 A 井进行了实际资料的分析处理,以验证各种方法的适用性,其结果如图 2 所示。图 2c 中 T_{2_DIST} 为实际测量的核磁共振测井 T_2 分布谱;图 2d 为 R_m 为利用基于 Swanson 参数模型构造的核磁毛管压力曲线计算的平均喉半径, CR_m 为岩心分析的平均孔

喉半径;图 2e 中 R_{max} 为利用核磁毛管压力曲线计算的最大孔喉半径, CR_{max} 为岩心分析的最大孔喉半径。从二者与岩心分析结果的对比可以看到,利用岩心分析的平均孔喉半径和最大孔喉半径与基于 Swanson 参数构造的核磁毛管压力曲线计算的平均孔喉半径和最大孔喉半径之间吻合很好,证实了基于 Swanson 参数构造核磁毛管压力曲线方法的准确性;图 2f 中 R_{c_DIST} 为利用核磁毛管压力曲线转换得到的储层孔喉半径分布谱,从图中孔喉半径分布的形态可以看到,在 xx10~xx30m 井段储层主

要以大孔径分布为主,表示该层段具有较好的孔隙结构,有利于形成良好的含油气带。而核磁共振测井 T_2 分布中显示该层段主要以双峰分布为主,其中第二个峰主要反映了油气的体积弛豫时间,证实了该层段的含油气性,与孔喉半径分布的显示结果一致。

图 3 为 A 井中 xx19.5m 深度岩心样品实验室压汞实验获取的压汞毛管压力曲线与利用核磁共振测井资料构造的毛管压力曲线的对比结果。其中图 3a 为实验室压汞毛管压力曲线(蓝色)与线性刻

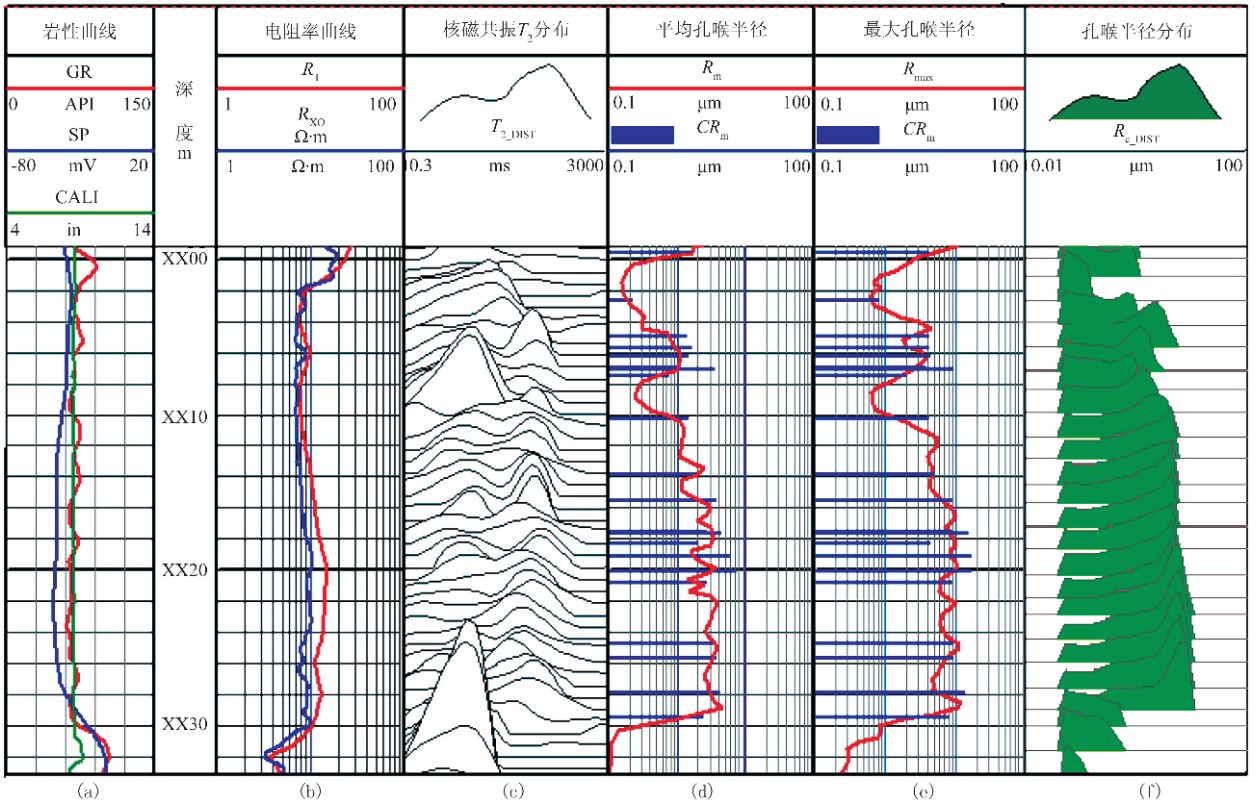


图 2 基于 Swanson 参数构造的核磁毛管压力曲线评价储层孔隙结构的应用实例(胜利油田 A 井)

(a) 岩性曲线; (b) 电阻率曲线; (c) 核磁共振 T_2 分布; (d) 平均孔喉半径; (e) 最大孔喉半径; (f) 孔喉半径分布

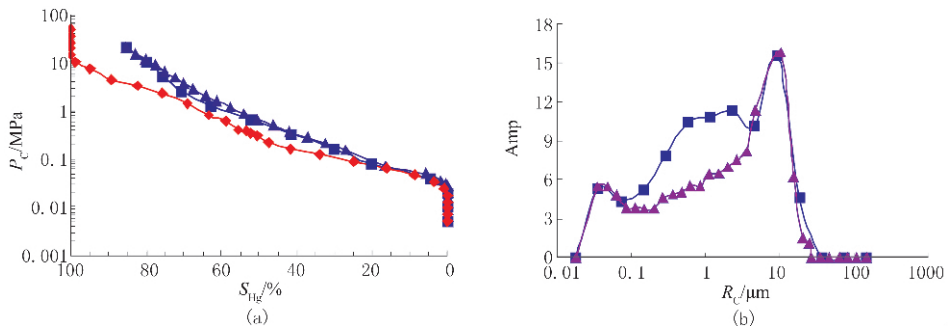


图 3 xx19.5m 深度岩心毛管压力曲线构造效果对比

(a) 毛管压力曲线形态特征对比; (b) 孔喉半径分布形态特征对比

度方法构造的毛管压力曲线(红色)以及基于 Swanson 参数构造的核磁毛管压力曲线(紫色)之间的形态对比。从图中可以看到,基于 Swanson 参数构造的核磁毛管压力曲线与实验室压汞毛管压力曲线之间形态吻合较好,而基于线性刻度方法构造的毛管压力曲线在大孔隙部分(低毛管压力段)较吻合,而在小孔隙部分(高毛管压力段)出现分叉。图 3b 为该岩样利用压汞毛管压力曲线获取的孔喉半径分布与利用基于 Swanson 参数构造的核磁毛管压力曲线获取的孔喉半径分布之间的形态特征对比。从二者的对比结果可见,所反映的孔喉半径分布特征基本吻合,均表现为双峰分布,且以大孔隙分布为主,显示该地层为良好的含油气储层。

5 结束语

(1) 三孔隙度组分百分比法在实际应用中并没有考虑到储层孔隙含烃对 T_2 谱形态的影响,因此其在孔隙结构较好和较差的储层中评价效果较好,而在孔隙结构中等的储层中,其评价结果会夸大实际储层的孔隙结构。

(2) 相似对比法和平均饱和度误差最小值法采用线性转换刻度的方法,将核磁共振测井 T_2 谱积分曲线转化为核磁毛管压力曲线,进而用以评价储层的孔隙结构,在实际应用中存在着大孔隙部分二者吻合较好,而在小孔隙部分出现分叉现象。虽然 Yakov 提出了用可变刻度函数的方法来构造核磁毛管压力曲线,但是该方法只是简单的数学统计结果,缺少理论依据,而且所有类型的储层其转换刻度函数的拐点均在相同的进汞压力点,同时这两种方法也没有考虑储层孔隙含烃对评价结果的影响,只适用于对 100% 饱含水储层的孔隙结构进行评价。

(3) 基于 Swanson 参数的核磁毛管压力曲线构造方法利用实际测量的核磁共振测井 T_2 分布和压汞毛管压力曲线来计算储层渗透率,结合核磁总孔隙度来构造核磁毛管压力曲线。该毛管压力曲线适

用于各种条件下的储层孔隙结构评价,其结果与岩心分析结果较吻合,具有一定的推广应用价值。

参考文献

- [1] 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: 130~142
- [2] 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: 22~41
- [3] Coates G R, Xiao L Z, Primmer M G. *NMR logging principles and applications*. Houston: Gulf Publishing Company, 2000: 42~78
- [4] Liu Z H, Zhou C C, Liu G Q et al. An innovative method to evaluate formation pore structure using NMR logging data. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007, paper S
- [5] Zhou C C, Liu Z H, Shi Y J et al. Applications of NMR logs to complex lithology interpretation of Ordos basin. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007, paper JJJ
- [6] Mao Zhi-qiang, Kuang Li-chun, Sun Zhong-chun et al. Effects of hydrocarbon on deriving pore structure information from NMR T_2 data. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007, paper AA
- [7] 肖亮. 利用核磁共振测井资料评价储集层孔隙结构的讨论. 新疆石油地质, 2008, 29(2): 260~263
- [8] 肖忠祥, 张冲, 肖亮. 利用孔、渗参数构造毛细管压力曲线. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 635~637
- [9] 刘晓鹏, 肖亮, 张伟. 储层毛管压力曲线构造方法及其应用. 西南石油大学学报, 2008, 30(6): 126~130
- [10] 刘堂宴, 王绍民, 傅容珊等. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3): 328~333
- [11] Yakov Volokitin. A practical approach to obtain primary drainage capillary pressure curves from NMR core and log data. *Petrophysics*, 2001, 42(4): 334~343
- [12] 肖亮, 刘晓鹏, 陈兆明等. 核磁毛管压力曲线构造方法综述. 断块油气田, 2007, 14(2): 86~88
- [13] 肖忠祥, 肖亮. 基于核磁共振测井和毛管压力资料的储层渗透率计算方法. 原子能科学技术, 2008, 42(10): 868~871
- [14] Xiao L, Mao Z Q, Xiao Z X et al. A new method to evaluate reservoir pore structure consecutively using NMR and capillary pressure data. SPWLA 49th Annual Logging Symposium, 2008, paper AA
- [15] 肖忠祥, 肖亮, 张伟. 利用毛管压力曲线计算砂岩渗透率的新方法. 石油物探, 2008, 47(2): 204~207

(本文编辑: 冯杏芝)