

## 致密气藏束缚与可动水研究\*

郭平<sup>1</sup> 黄伟岗<sup>2</sup> 姜贻伟<sup>3</sup> 毕建霞<sup>3</sup> 陈召佑<sup>4</sup>(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院  
3.中国石化中原油田分公司 4.中国石化华北分公司)

郭平等.致密气藏束缚与可动水研究.天然气工业,2006,26(10):99-101.

**摘 要** 致密气藏一般束缚水含量高,但不少气井仍可产出水,这种现象很难解释。采用离心毛细管压力法、气驱水动态法及核磁共振法在实验室内研究测定气藏束缚水饱和度,用测井方法确定气藏原始含水饱和度,根据原始含水饱和度与束缚水饱和度相差值大小来确定可动水饱和度大小。采用中原油田桥口、白庙致密气藏及鄂尔多斯大牛地气田具有代表性的岩心开展渗流实验测试后发现:随着气流速度的增大,岩心含水饱和度逐渐减小,甚至会低于用常规方法测试的束缚水饱和度,相应气相渗透率也逐渐增大,说明气层束缚水是相对气相渗流速度的一个物理量,即具有速度敏感性,再不是一个定值,这就解释了致密气藏束缚水高、原始含水饱和度比束缚水低而地层水有可能流动的原因。研究结果对其他致密气藏的开发也有直接的指导意义。

**主题词** 致密砂岩 气藏 束缚水饱和度 含水饱和度 渗透率 研究

近年来,我国低渗致密气藏发现已达到较大比例,如何经济有效地开发这些难采储量,已成为当前气田开发的难题<sup>[1]</sup>。束缚水饱和度定义为存在于储层的岩石表面、孔缝的角隅以及微毛细管孔道中的不流动水<sup>[2]</sup>,但未谈及在什么条件下。致密气藏束缚水高已广为接受,但有关气藏可动水研究却比较少。中原油田的桥口、白庙气藏和鄂尔多斯大牛地气田均属低渗致密气藏,实验室测得束缚水饱和度较高,有些气井原始含水饱和度低于实验室测得的束缚水饱和度,但在开发过程中还能采出地层水,这是一个较难解释的现象。为此,首先采用离心毛细管压力法、气驱水动态法及核磁共振法确定气藏束缚水饱和度,再根据测井方法确定原始含水饱和度,从而确定可动水饱和度大小。通过动态法测试发现随着气流速度的增大,岩心含水饱和度逐渐减小,甚至可以低到束缚水饱和度以下,气相渗透率逐渐增大,这解释了气层束缚水可动的原因。

## 一、实验样品

实验所用的岩心分别取自中原油田桥口、白庙气藏及鄂尔多斯大牛地气田,地层水采用现场水分分析资料进行直接配制。桥口及白庙进行 3 种实验的砂岩岩心分别见表 1;大牛地气田进行离心毛细管压

表 1 中原油田桥口及白庙实验岩心实验内容表

井号	编号	孔隙度 (%)	绝对渗透率 ( $\mu\text{m}^2$ )	实验类型
桥 75	1	12.95	$6.14 \times 10^{-3}$	气驱水、毛细管压力、核磁
桥 75	3	11.72	$4.97 \times 10^{-3}$	气驱水、毛细管压力
白 18	214	13.94	$9.36 \times 10^{-4}$	气驱水、毛细管压力、核磁
白 18	231	12.41	$1.51 \times 10^{-3}$	气驱水、毛细管压力
桥 75	26	10.17	$2.10 \times 10^{-4}$	气驱水、毛细管压力
桥 75	27	9.97	$3.04 \times 10^{-4}$	气驱水、毛细管压力、核磁

力测试岩心及结果见表 2,所进行核磁共振测试的岩心及结果见表 3。

表 2 大牛地气田离心机法测得束缚水饱和度和毛细管压力数据表

井号	岩样编号	孔隙度 (%)	渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	束缚水饱和度 (%)	毛细管压力 (MPa)
大 7	D7-3	9.2	0.85	67.30	5.094
大 8	D8-4	10.18	0.766	53.47	5.094
大 10	D10-2	10.73	0.422	62.31	5.077
大 22	D22-17	11.36	0.272	66.16	5.060
大 24	D24-19	13.18	0.634	67.32	5.094
DK9	DK9-E	9.18	0.458	67.53	5.127

\* 本文受到“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金资助(PLN9924)。

**作者简介:**郭平,1965年生,硕士,教授;主要从事油气藏流体相态、气田及凝析气田开发、注气提高油气采收率研究与教学工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:13908076902。E-mail:guopingswp@vip.sina.com

表3 大牛地气田核磁共振测试束缚与可动水表

井号	编号	单位体积 $T_2$ 幅度和	核磁孔隙 度(%)	渗透率 ( $10^{-4} \mu\text{m}^2$ )	可动流体 ( $\phi$ %)	束缚流体 ( $\phi$ %)
D22	17	234.79	9.78	2.72	10.42	89.58
D8	4	228.10	9.49	7.66	27.56	72.44
D10	2	217.57	9.02	4.22	23.30	76.70
D5	3	198.59	8.17	4.11	28.93	71.07
DK8	C	177.73	7.24	3.45	27.73	72.27
DK9	B	159.75	6.44	3.98	22.89	77.11

## 二、实验原理

### 1. 毛细管压力及气驱水测试原理

毛细管压力测试按相关技术标准<sup>[3]</sup>进行测定,用离心法测试毛细管压力曲线,实验用仪器设备是美国 BECKMAN 公司生产高速离心机。气驱水实验方法类似气驱水相渗曲线测试<sup>[4]</sup>,实验过程是用地层水将岩心饱和以后,用4种不同的速度连续驱替,当某一种驱替速度稳定以后,测其含水饱和度和气相渗透率,实验所用仪器是美国 CORE 公司生产相渗测试仪。

### 2. 核磁法测试可动水实验原理<sup>[5]</sup>

核磁共振测井检测的是氢核( $H^1$ )的磁化强度。当含有油和水的样品处在静磁场中时,流体中所含的氢核( $H^1$ )就会被磁场极化,此时若施加一定频率(拉莫频率)的射频场,就会产生核磁共振,随后撤掉射频场,可接收到一个幅度随着时间以指数函数衰减的信号,用纵向弛豫时间( $T_1$ )和横向弛豫时间( $T_2$ )来描述该信号衰减的快慢, $T_1$ 和 $T_2$ 在岩石核磁共振测量中,一般采用 $T_2$ 测量法。根据核磁共振理论分析, $T_1$ 和 $T_2$ 均反映岩石孔隙比表面的大小,即

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (1)$$

式中: $T_2$ 为单个孔隙内流体的核磁共振 $T_2$ 弛豫时间; $\rho$ 为岩石表面弛豫强度常数; $S/V$ 为单个孔隙的比表面。

岩石多孔介质是由不同大小孔隙组成的,存在多种指数衰减信号,总的核磁弛豫信号 $S(t)$ 是不同大小孔隙的核磁弛豫信号的叠加。

$$S(t) = \sum A_i \exp(-t/T_{2i}) \quad (2)$$

式中: $T_{2i}$ 为第 $i$ 类孔隙的 $T_2$ 弛豫时间; $A_i$ 为弛豫时间 $T_{2i}$ 组分所占的比例,对应于岩石内在的比表面或孔隙半径的分布比例。

核磁共振 $T_2$ 谱是由 $T_2$ 测试时获得的回波信号

经过复杂的数学反演计算得到的。由核磁共振原理可知, $T_2$ 谱定性地反映了岩样内部包含流体孔隙的大小分布, $T_2$ 值越大,对应的孔隙半径也就越大。根据油层物理学理论,当孔径小到某一程度后,孔隙中的流体将被毛细管力所束缚而无法流动,因此对应弛豫谱上存在一个界限,当孔隙流体的弛豫时间大于某一弛豫时间时,流体为可动流体,反之则为束缚流体。这个弛豫时间界限,称为可动流体截止值,并且对岩心进行0.6664 MPa离心力下的高速离心,核磁共振测出的可动流体相当于饱和水岩心在0.6664 MPa离心力下离出的水量,而且对离心后的岩样进行核磁共振测量,测量参数与离心前相同。

实验研究发现,绝大多数砂岩岩样的可动流体 $T_2$ 截止值通常位于 $T_2$ 谱中两峰的交汇点附近,可以通过这种方法实现可动流体的快速确定。

对饱和水岩样进行核磁 $T_2$ 测试,得到岩样的 $T_2$ 幅度和,然后用该值除以岩样的外观体积,求得该岩样单位体积 $T_2$ 幅度和,最后将每块岩样的 $T_2$ 幅度和值代入式(1),即可得到各岩样的核磁孔隙度值。可动流体饱和度可根据 $T_2$ 截止值从 $T_2$ 谱中很容易地计算出来。确定核磁孔隙度和可动流体百分数后,便容易求得如下各项重要值:①可动孔隙度=核磁孔隙度 $\times$ 可动流体饱和度;②束缚水饱和度=100-可动流体饱和度。仪器设备使用 MPSK-4 型磁共振分析仪。

## 三、实验结果与分析

### 1. 毛细管压力测试

从原油田的6条毛细管压力曲线看出,在毛细管压力较低阶段,6条线共分为高、中、低渗3组,高渗组(Q75-1、Q75-3)位于最下方,而低渗组位于最上方(Q75-26、Q75-27),中渗组位于中间(B18-214、B18-231),即在相同毛细管压力下,渗透率越低则含水饱和度越高,说明渗透率越低不一定束缚水就越高,这与矿物成分及孔隙结果分布有关。大牛地气田6个代表性层位的岩心离心毛细管压力测试结果,除D8-4和D10-2渗透率相对较高、束缚水含量较低外,其他均较高,在67%左右。

### 2. 气驱水实验

采用不同气流速度连续驱替所得驱替压差与含水饱和度及气相渗透率关系,中原岩心测试结果与大牛地气田相近,大牛地岩心的测试情况见图1。根据达西定律,在相同岩心上,压差与渗流速度呈正比,因此压差实际上是渗流速度的反映,不同驱替压力所对应的束缚水饱和度不一样,总的趋势是随驱

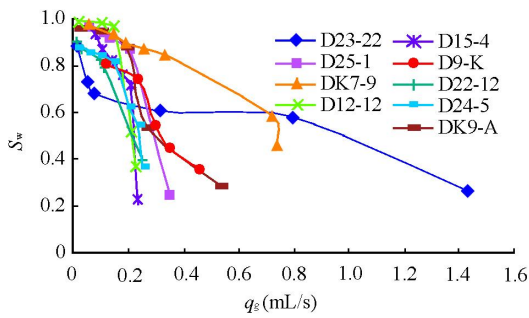


图 1 大牛地岩心不同气流速度连续驱替下含水饱和度图

替压力上升束缚水饱和度下降,中原岩心除渗透率最低的岩心 Q75-26 束缚水饱和度明显偏高、渗透率最高的岩心 Q75-1 明显偏低外,其他岩心束缚水饱和度变化规律较一致,该结果与毛细管压力测试有些不一致,这与实验过程有关,毛细管压力测试是水驱气渗吸过程,而气驱水是排驱过程。同时不同驱替压力下气相渗透率变化随着驱替压力的上升而升高,出现速敏性,在规律上出现了明显的分组现象,即渗透率高的岩心上升更快,而渗透率低的岩心上升更慢。大牛地气田中也可得到相同结论,不同

的是渗透率越低,在增加气流速度时,气相渗透率上升更快,束缚水饱和度下降也非常明显。无论如何,在近井地带的气流速度大,因此原始含水虽然不高但仍可能会流动,在一些低渗气藏,随着开发的进行出现试井渗透率升高或产量上升的情况,这与地层水参与流动而改善了渗流条件有关。

### 3. 核磁可动水测试

采用核磁测试中原岩心  $T_2$  弛豫谱结果见表 4,从测试结果看,束缚水饱和度与渗透率没有明显的关系,核磁法比离心法的束缚水饱和度更高。从测井解释结果来看,Q75 的束缚水与原始含水饱和度相近,生产过程中不会出水或很少出水;白 18 井的原始含水饱和度较高,可动水较高,出水较为严重;而桥 75 井有一定可动水量,生产过程中会出水。大牛地气田测试结果见表 3,核磁共振测试得平均束缚水饱和度达到 76%,毛细管压力得到束缚水饱和度 67%,但原始条件下含水饱和度较低,按理说地层水不会流动,但实际生产中有地层水产出,这可能就是地层不缚水的速度敏感性而引起。

表 4 岩心核磁测试结果表

岩样编号	单位体积 $T_2$ 幅度和	核磁孔隙度 (%)	核磁可动流体饱和度 (%)	核磁束缚水饱和度 (%)	离心法束缚水饱和度 (%)	测井解释含水饱和度 (%)
Q75-1	293.66	12.41	52.34	47.66	42.39	44.1
B18-214	339.77	14.46	44.75	55.25	51.45	74.0
Q75-27	234.11	9.75	54.37	45.63	51.35	62.2

## 四、结论与认识

(1)离心法测试毛细管压力,在不同压力下其束缚水不一样,低压下渗透率高的岩心束缚水低,高中低渗岩心特征不同,而在较高压力下渗透率相近的岩心可能会出现反常。

(2)在渗流过程中地层含水饱和度不是个定值,存在速度敏感性,随气流速度增大会产生含水饱和度下降并低于常规方法测试的束缚水饱和度,伴随渗透率上升现象,高中低渗岩心表现为不同的特征。

(3)核磁共振测试束缚水比离心法测试值偏大,但其影响的规律是一致的,可作为分析可动水的辅助手段。

(4)影响地层流动的因素很多,但至少应考虑速敏影响,有必要进行深入研究,并从生产中去检验和证实。

(5)在一些致密气藏,实验室测定束缚水饱和度和

很高,而原始含水饱和度比束缚水饱和度低,按理说地层水不应流动,但开采时仍会生产出地层水,这也是含水饱和度速度敏感性的体现。

### 参 考 文 献

- [1] 李士伦,郭平,孙雷,等.拓展新思路,提高气田开发水平和效益[J].天然气工业,2006,26(2):1-5.
- [2] 袁庆峰,叶庆全.油气田开发常用名词解释[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [3] SY/T5346-1994 岩石毛细管压力曲线的测定[S].北京:石油工业出版社.
- [4] SY/T 5843-1997 气水相对渗透率测定[S].北京:石油工业出版社.
- [5] 王为民,郭和坤,叶朝辉.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J].石油学报,2001(6):40-44.

(修改回稿日期 2006-05-23 编辑 韩晓渝)