

基于核磁共振和压汞实验的储层束缚水饱和度计算方法

赵毅¹, 胡斌², 张路崎³, 赵永昌⁴

1. 中国石油大学(北京)资源与信息学院, 北京 102249
2. 中国石化集团江苏石油勘探局试采一厂输油一队, 江苏江都 225265
3. 中国石化集团江苏石油勘探局试采二厂开发所, 江苏金湖 211600
4. 中国石油集团测井有限公司华北事业部, 河北任丘 062552

摘要 为了准确计算新疆某地区砂岩储层的束缚水饱和度, 从 6 口井中分别选取 142 块砂岩样品进行了核磁共振实验和压汞实验测量。根据核磁共振实验结果, 采用 T_2 谱面积比值法、称重法、谱系数束缚水截止值 (SBVI) 法和统一 T_2 截止值法分别求取束缚水饱和度, 认为称重法和 T_2 谱面积比值法更佳, 适用于建立研究区储层的束缚水饱和度模型。在核磁共振实验基础上, 考察了压汞实验所得到的束缚水饱和度的适用条件, 结果表明: 对于孔隙度小于 15%、渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品, $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力可以将可动水驱替干净, 在压汞实验得出的毛管压力曲线上所对应的此驱替压力下的含水饱和度为实际的束缚水饱和度; 对于孔隙度大于 15%、渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样, $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力可将部分束缚水驱出, 此驱替压力下的含水饱和度不是实际的束缚水饱和度。对于中、高、孔渗储层, 利用储层油水密度差所产生的浮力等于毛细管压力这一条件, 在纯油层段转化成合适的储层驱替压力, 在毛管压力曲线上读取此驱替压力下的含水饱和度即实际的束缚水饱和度。

关键词 束缚水饱和度; 核磁共振; 压汞

中图分类号 P631.813

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0064-04

Calculation of Reservoir Irreducible Water Saturation Based on NMR Experiment and Mercury Penetration Experiment

ZHAO Yi¹, HU Bin², ZHANG Luqi³, ZHAO Yongchang⁴

1. Faculty of Natural Resources & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. First Team of Oil Transportation, First Oil Trial-Production Factory, China Petrochemical Group Jiangsu Petroleum Exploration Bureau, Jiangdu 225265, Jiangsu Province, China
3. Research Institute of Exploitation, Second Oil Trial-Production Factory of China Petrochemical Group Jiangsu Petroleum Exploration Bureau, Jinhu 211600, Jiangsu Province, China
4. Huabei Division, China Petroleum Logging Co. Ltd., Rengqiu 062552, Hebei Province, China

Abstract In order to calculate the irreducible water saturation of sandstone reservoir in a certain area in Xinjiang, 142 sandstone rock samples are selected from six wells for experimental Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and mercury penetration measurements. According to the result of NMR, using methods of T_2 spectrum area ratio, weighing, Spectrum Bound Volume Irreducible (SBVI), unified $T_{2cut-off}$ to get water saturation, it is seen that the weighing method and the T_2 spectrum area ratio method are better, and the two methods are used to build irreducible water saturation model of sandstone reservoir in the study area. Based on NMR experiments measurements, all application conditions of irreducible water saturation derived from mercury intrusion capillary pressure experiments are studied. The studies suggest that for rock samples with the porosity of less than 15% and the permeability of less than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the displacing force of $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ can drive all movable water, and that the water saturation derived from mercury penetration experiments is the true irreducible water saturation. For rock samples with porosity greater than 15% and permeability less than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the displacing force of $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ can only drive some movable water, and the water saturation derived from mercury penetration experiments is not the

收稿日期: 2009-12-21

作者简介: 赵毅, 博士研究生, 研究方向为测井资料综合解释与数据处理, 电子信箱: clearwater_2002@163.com

2.2 核磁束缚水饱和度对比分析

核磁共振实验采用 T_2 谱面积比值法、称重法、SBVI 法和统一 T_2 截止值法来确定样品束缚水饱和度。称重法是目前公认的最为准确的方法,将其他几种方法结果与称重法结果进行对比。图 1 为 63 块实验样品 T_2 谱面积比值法和称重法确定的束缚水饱和度对比,这 2 种方法确定的数值比较接近,可以作为建立模型的基础数据。

SBVI 法和统一 T_2 截止值法确定束缚水饱和度属于间接

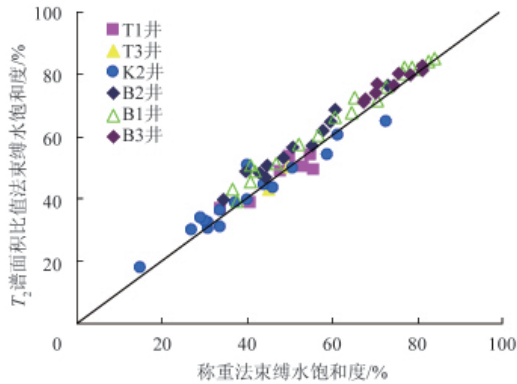


图 1 T_2 谱面积比值法、称重法确定的束缚水饱和度对比
Fig. 1 Comparison of bound water saturation determined by area under T_2 spectrum and weighing method

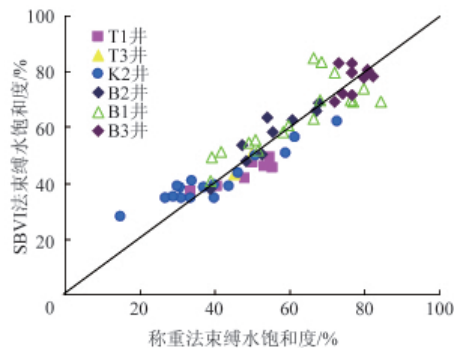


图 2 SBVI 法与称重法确定的束缚水饱和度对比
Fig. 2 Comparison of bound water saturation determined by weighing and SBVI method

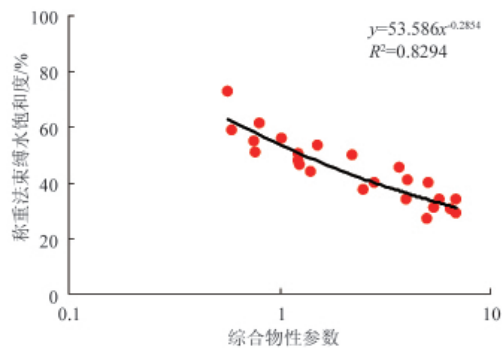


图 4 A 区块束缚水饱和度与综合物性参数关系
Fig. 4 Relationship between the bound water saturation interpretation model and comprehensive property parameter in block A

方法。这 2 种方法是采用所有实验样品回归一个(组)经验系数或计算一个平均 T_2 截止值,然后分别计算。表 2 为 SBVI 法和统一 T_2 截止值法束缚水饱和度模型的参数。

图 2、图 3 分别为 SBVI 法、统一 T_2 截止值法与称重法确定的束缚水饱和度结果对比。如图所示,SBVI 法、统一 T_2 截止值法确定的束缚水饱和度与称重法确定的束缚水饱和度相关性较为一般。综合以上不同方法确定的束缚水饱和度结果对比分析可以看出, T_2 谱面积比值法优于 SBVI 法、统一 T_2 截止值法。

利用称重法或 T_2 谱面积比值法获取的束缚水饱和度与对应岩心样品的综合物性参数 $\sqrt{K/\phi}$ (K 为岩心渗透率, ϕ 为岩心孔隙度)之间建立相关关系,利用此相关关系计算整个井段的束缚水饱和度。图 4 和图 5 分别为 A 区块 T1、T3、

表 2 束缚水饱和度模型参数

Table 2 Parameters of bound water saturation model

井名	SBVI 模型权系数	统一 T_2 截止值/ms	样品数
T1 井	0.055	24.61	7
T3 井	0.062	39.29	2
K2 井	0.048	28.34	17
B1 井	0.017	36.75	18
B2 井	0.032	27.55	10
B3 井	0.015	50.91	9

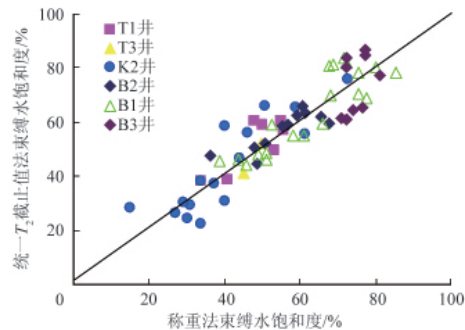


图 3 统一 T_2 截止值法与称重法确定的束缚水饱和度对比
Fig. 3 Comparison of bound water saturation determined by unified T_2 cutoff value and weighing

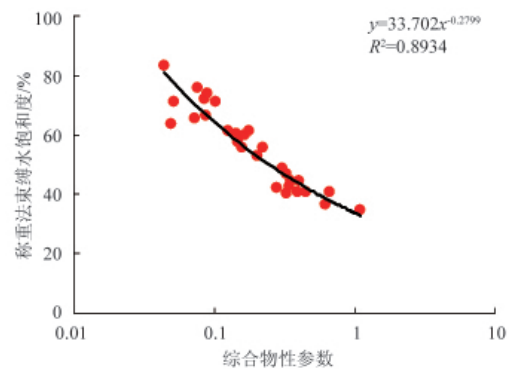


图 5 B 区块束缚水饱和度与综合物性参数关系
Fig. 5 Relationship between the bound water saturation interpretation model and comprehensive property parameter in block B

K2 井和 C 区块 B1、B2、B3 井实验样品束缚水饱和度与综合物性参数关系图。

2.3 压汞实验确定的束缚水饱和度适用条件

根据压汞毛管压力测量结果,将压汞数据中汞压力转换成油水两相条件下的驱替压力,在毛管压力曲线上读取压力为 $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 时对应的束缚水饱和度,然后将其与核磁束缚水饱和度进行对比。结果表明部分样品的核磁束缚水饱和度和大于的压汞实验得到的束缚水饱和度(图 6)。对于孔隙度大于 15%、渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品, $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力已把部分束缚水也驱替出来,这时对应的含水饱和度不是实际的束缚水饱和度。对于孔隙度小于 15%、渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样, $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力仅把可动水驱替干净,这时对应的含水饱和度是实际的束缚水饱和度。

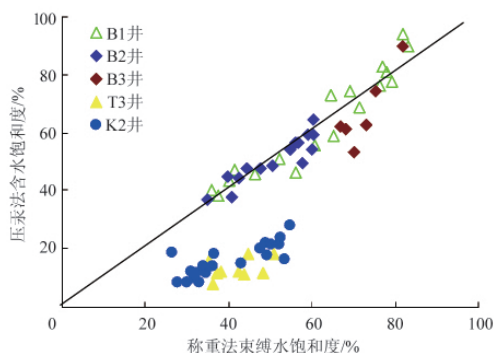


图 6 核磁束缚水饱和度与压汞实验得到的含水饱和度对比

Fig. 6 Comparison of water saturation obtained by NMR bound water saturation and oil-water two-phase mercury penetration experiment

因此,利用压汞实验得到中、高孔渗样品的束缚水饱和度,关键是求取合适的驱替压力。利用储层中的油水密度差所产生的浮力等于毛细管压力这一条件,通过 T3 井和 K2 井的已知的油水界面参数求出纯油层中每块压汞实验样品所对应深度的毛管压力值,再通过毛管压力曲线插值得到所对应的含水饱和度,此时的含水饱和度即为实际的束缚水饱和度。具体利用下式:

$$P_c = \Delta\rho \cdot g \cdot h \cdot 0.001/c \quad (1)$$

其中, P_c 为地层条件下油-水的毛管压力, MPa; g 为重力加速度 m/s^2 ; h 为油藏厚度, m; $\Delta\rho$ 为油水密度差, g/cm^3 ; c 为油水两相条件下的驱替压力转换成压汞数据中汞压力的比例系数,大小为 0.0709。

将 T3、K2 井核磁共振实验得到的束缚水饱和度与压汞实验得到的束缚水饱和度做比较,结果表明两者很接近(图 7);说明对于中、高孔渗的样品,通过求取合理的驱替压力得到的束缚水饱和度的方法是合理准确的。

3 结论

1) T_2 谱面积比值法、称重法是实验直接测量的结果,2

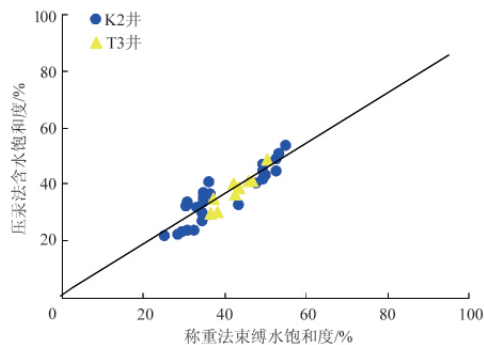


图 7 核磁束缚水饱和度与储层条件下压汞实验得出的含水饱和度对比

Fig. 7 Comparison of water saturation obtained by NMR bound water saturation and reservoir condition mercury penetration experiment

种方法确定的束缚水饱和度数值非常接近,可以作为建立模型的基础数据; T_2 谱面积比值法要优于 SBVI 法、统一 T_2 截止值法;

2) 对于孔隙度小于 15%、渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,在 $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力下压汞实验得出的含水饱和度为实际的束缚水饱和度;

3) 对于孔隙度大于 15%、渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,在 $6.897 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 的驱替压力下压汞实验得出含水饱和度不是实际的束缚水饱和度,通过储层中油水密度差所产生的浮力等于毛细管压力这一条件,在纯油层层段读取毛管压力曲线上对应驱替压力下的含水饱和度即为实际的束缚水饱和度。

参考文献 (References)

- [1] 鲜德清, 傅少庆, 谢然红. 核磁共振测井束缚水模型研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(3): 578-582.
Xian Deqing, Fu Shaoqing, Xie Ranhong. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(3): 578-582.
- [2] 李宁, 周克明, 张清秀, 等. 束缚水饱和度实验研究 [J]. 天然气工业, 2002, 22(S1): 110-113.
Li Ning, Zhou Keming, Zhang Qingxiu, et al. Natural Gas Industry, 2002, 22(S1): 110-113.
- [3] 高楚桥, 袁云福, 吴洪深, 等. 莺歌海盆地束缚水饱和度测井评价方法研究[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 38-40.
Gao Chuqiao, Yuan Yunfu, Wu Hongshen, et al. Natural Gas Industry, 2003, 23(5): 38-40.
- [4] 黄宙宙, 付有升, 李舟波, 等. 海拉尔盆地碎屑岩储层束缚水饱和度的确定[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(4): 713-718.
Huang Buzhou, Fu Yousheng, Li Zhoubo, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(4): 713-718.
- [5] 成志刚, 王黎. 利用 NMR 资料建立束缚水解释模型[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(2): 66-67.
Cheng Zhigang, Wang Li. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(2): 66-67.

(责任编辑 刘志远)