

核磁共振成像技术定量分析粘土矿物对 油气二次运移过程的影响

周波^{1,3)}, 罗晓容²⁾, 王毅¹⁾

1) 中石化石油勘探开发研究院勘探所, 北京, 100083;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 油气运移重点实验室, 北京, 100029;

3) 中国地质大学(北京), 资源学院, 100083

内容提要:本文利用核磁共振成像技术定量分析油气运移含油饱和度变化, 首次获得了玻璃珠孔隙介质中粘土矿物(伊利石)含量变化时油饱和度变化的规律, 通过对实验数据的总结, 得到以下结论: ① 油气运移通道具有不均一性, 但随着粘土含量的增加, 油气运移通道上残余油饱和度增加, 初始部分(指实验中油未发生运移时油占据的部分)残余油的含油饱和度亦增加; ② 由于初始部分残余油饱和度和运移通道上的残余油饱和度都变大。因此, 粘土矿物的存在, 使得残余油饱和度增加, 最终降低了油气聚集的效率, 不利于油气运移聚集。

关键词: 油气运移; 粘土矿物; 核磁共振

油气二次运移是石油地质学研究的重要内容, 也是实际勘探中要解决的重要问题。然而油气运移一直以来都是石油地质学研究的薄弱环节。针对这一问题, 研究者展开了大量的研究工作。

近年的研究使人们相信, 油气在盆地内的二次运移是一个极不均一的过程(Harms, 1966; Thomas, 1995; Schowater, 1979; Smith, 1966; 张发强, 2004)。即便是在均匀的孔隙介质内, 油气的运移也只沿着通道内有限的范围发生, 其体积大约只占全部输导层的 1%~10% (England, 1987; Catalan, 1992; Dembicki, 1989)。

为此, 研究者设计了大量的物理数学实验, 讨论影响二次运移的各种物理学因素。近年来, 优势路径的提出(Schowater, 1979; Smith, 1966; 张发强, 2004), 逾渗理论的应用(Wilkinson, 1986; Meakin, 1991), 新的实验手段如: X射线吸收法、超声波技术、核磁共振技术(肖立志, 1994; Wang, 1996; 苗胜, 2004), 以及地球化学资料的应用, 都使得油气二次运移的研究思路、方法和手段都发生了巨大变化。这些为油气二次运移动力学机理的研究提供了可能性。

然而, 前人对油气二次运移的研究在微观上基

于机理研究, 而宏观上则基于地质现象模拟, 目前尚未见到有人对运移通道上存在特殊矿物时油气运移的特点进行分析。本文通过物理实验, 利用核磁共振成像技术观察粘土矿物对油气运移过程的影响, 讨论油气二次运移时粘土矿物的影响作用。

1 核磁共振成像技术

1.1 实验测量方法

施加一定频率射频磁场的条件下, 流体中的氢核会产生核磁共振; 撤掉磁场后, 该振动逐渐停止下来。在此过程中, 可以测到共振幅度随时间以指数函数衰减的信号, 由纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 来描述。由于对前者的采集往往不准, 一般多用 T_2 :

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

(1) 其中 T_2 为横向弛豫时间, T_v 为与自由流体体积有关的弛豫时间分量, ρ 为固体颗粒表面性质; S/V 为单个孔隙的比表面积。

实验中采用了自旋一回波法核磁共振成像技术(Wang, 1996), 每个像素元的信号强度或亮度(L)可用下式表示:

注: 本文为国家“973”重点基础研究发展规划项目(编号 G1999043310)的成果。

收稿日期: 2006-12-22; 改回日期: 2007-06-13; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 周波, 男, 1976年生。现为中国石化石油勘探开发研究院博士后。主要从事油气成藏动力学和油气运移数值模拟工作。通讯地址: 100083, 北京市学院路31号, 中国石化石油勘探开发研究院勘探所; Email: zhoubo@pepris.com。

$$L = L_0 \text{exe}(-T_e/T_2) \quad (2)$$

式中 L_0 为一常数,与像素元内所含氢原子数成正比; T_e 为回波间隔,可直接由测试仪器控制, T_2 为横向弛豫时间,对应着信号衰减的速率。岩石样品是由不同大小孔隙组成的,因而 L 是不同孔隙的弛豫信号的叠加。

对于油和水, L_0 的值近似而 T_2 值相差较大,当在孔隙水中加入如 Mn^{2+} 等顺磁离子,水相的弛豫时间减小,油、水信号得以分辨。利用油和水信号衰减速度的差别,采用不同的回波间隔 T_e 的进行两次测量,并同时测得含 Mn^{2+} 水溶液和油的 L 值,即可达到区分油和水的目的并得到图像上各点的含油饱和度(苗胜,2004)。

测量时在模型旁边附加两定标管,分别装含 Mn^{2+} 的水溶液和油。调整 Mn^{2+} 的水溶液的浓度到 2000×10^{-6} ,使得水标定管的接收信号为 0。这样油标定管的亮度即可作为基准亮度信号。若扫描获得的图像中某一像素单位内平均亮度为 A_0 ,油定标管的平均象素亮度为 a_0 ,孔隙空间的平均含油饱和度 S_0 可由下式计算: $S_0 = \varphi(A_0/a_0)$ (3) 其中 φ 为模型孔隙度。

2 实验方法及过程

2.1 实验材料

实验所用的孔隙介质材料为具一定粒度、分选均匀的玻璃微珠和纯伊利石样品。筛选玻璃珠颗粒粒径范围为 0.80~0.90mm,用于填装玻璃微珠的玻璃管内径为 2.26cm,长为 55.5cm。所用排替流体为染色煤油,粘度在 16℃时为 1.698 mPa·s,密度为 0.785g/cm³。实验所用核磁共振成像仪为 Wandong Medical i-Magnate 1.5 T,共振频率 150 MHz。

2.2 实验过程

将实验所选玻璃微珠和玻璃管经水、强酸和强碱清洗后加热到 550℃,保持恒温 30min,使其表面润湿性呈强亲水性(黄延章,2001),然后将玻璃微珠和伊利石样品按比例混合,浸入蒸馏水中并搅拌。将表面呈强亲水性的玻璃管底端用胶塞封堵,由上端注入蒸馏水至满。然后用漏斗将伊利石和玻璃珠玻璃微珠连水慢慢从管上端倒入管内,同时敲打震荡玻璃管,直到玻璃管完全为混合物所充填;用一个由细胶管穿通的胶塞将其封堵。

将装好的玻璃管颠倒直立,带细胶管的一头向下;用针管穿透管子顶端胶塞,向模型顶部注入一定

体积的染色煤油,静置 10 min 后将玻璃管颠倒,含油的部分在下,让油完全在浮力作用下开始运移,直至油运移至顶部,再静置 24 h,使得装置中能移动运移的油均已运移,然后用核磁共振仪器测量玻璃管内不同位置的含油饱和度。

3 实验结果和分析

实验中,笔者通过混合有不同浓度粘土介质条件下的玻璃管孔隙介质中的油气运移过程进行了全面的观察。主要分析粘土介质对油气运移不同阶段的油气聚集量的影响。

运移实验开始后,在原始油柱前缘生长出一些细小的分枝。逐渐地,一个小分枝可变粗发展为主路径,而其它分枝形成后便可能停止不动;主路径前缘处不断出现新的分支并以其中一支为主向上伸展,最后在模型中形成蜿蜒曲折的运移路径。路径内被油饱和的主干路径的宽度比较小(2~3mm),基本直立(张发强,2004)。

图版 I-2 分别为 0%、5%、10% 和 20% 浓度粘土按比例与玻璃珠混合后油气运移路径经核磁共振成像仪进行扫描后得到的黑白图,从上到下为油的运移方向,其中亮色的表示油,暗色的则为水。为了便于分析,本文将玻璃管中油气运移分为三个部分:

(a) 初始运移部分:指油气未发生运移时油占据玻璃管部分。

(b) 运移通道部分:油气发生运移的部分,即整个玻璃管减去(a)和(c)部分,本文分析中所用的运移通道是指图版 I-2 中矩形方框(b)内的部分。

(c) 顶部聚集部分:油气到达玻璃管顶部时,油最终聚集的部分;从图版 I-2 可以看出,三个部分的油饱和度的变化规则是不同的。整体上来看,随着粘土介质含量的增加,初始运移部分和油气运移通道部分的油呈分散状态,油占据玻璃管的面积有增大趋势,而顶部聚集部分的油聚集量减小。

为对运移路径上含油饱和度的分布及其随运移过程的变化进行定量分析,进一步处理实验获得的二维核磁共振图像,得到图版 I-1。图中,横坐标代表玻璃管的宽度(以像素为单位),纵坐标为运移通道上沿运移方向上的含有饱和度的平均值。从该图可以看出,不同粘土含量的玻璃管实验在图版 I-1 中所表现的通道形态都不完全相同,这表明油运移的通道具有一定的不均一性。虽然 0% 和 5% 粘土含量的运移通道上含油饱和度变化不大,但是随着粘土矿物含量的进一步提高,运移通道上的油饱和

度则明显升高。这表明,粘土含量的增加使得油气运移通道上的含油饱和度增加,因此,可以认为粘土介质的存在对油有吸附作用,造成路径上的残余的含油饱和度的量增加,会使得油气运移过程中油的损失量增加。

图版 I-1 反映的是油运移通道上含油饱和度的变化,为了解油运移结束后,整个玻璃管中含油饱和度的变化特征,笔者对整个核磁共振图片进行扫描分析,获得图版 I-3。图中横坐标为沿垂直油运移方向上油的累计量(以像素点累计),纵坐标为玻璃管的长度,单位为厘米。从该图可以看出油气在初始运移部分、顶部聚集部分和运移通道部分的综合变化规律,可以更清晰获得油气运移结束后残余油的多少。从图中可以看出,随着粘土含量的增加,初始运移部分的油饱和度含量增加,通道上的含油饱和度增加,顶部聚集部分的含油饱和和减少。很显然,不论是在初始运移部分还是运移通道上,粘土矿物的增加都使得残余油的含量增加,降低了油气向有利区带聚集的效率。

通过上述实验结果分析可以看出,粘土矿物的存在对油气运移通道上的残余油饱和度的变化影响比较大,笔者认为造成现象的可能的原因有两种:第一,粘土矿物本身具有吸附效应,当油发生运移时,存在于油气运移通道中的粘土矿物会吸附通过通道的油,当油运移结束后,吸附在粘土矿物上的保留,这就导致了运移通道上残余油的饱和度增加。第二,当孔隙介质中间夹入粘土介质时,粘土含量越多,相当于孔隙介质的孔喉半径相应变小,而根据前人研究,孔喉半径的变小会导致运移路径变窄,同样可能导致运移通道上的残余油饱和度增加。

4 结论

本文利用核磁共振成像技术定量分析油气运移的含油饱和度变化,首次获得了玻璃珠孔隙介质中粘土矿物(伊利石)含量变化时油饱和度变化的规律,通过对实验数据的总结,得到以下结论:

(1) 油气运移通道具有不均一性,但随着粘土含量的增加,油气运移通道上残余油饱和度增加,初始部分残余油的含油饱和度亦增加。

(2) 由于初始部分含油饱和度和运移通道的含油饱和度都变大,因此,粘土矿物的存在,使得残余油饱和度增加,降低了油气聚集的效率。

致谢: 本文工作中得到中国天然气集团公司廊坊渗流研究所和万东医疗公司核磁事业部研究人员

的热心帮助,特此谢忱。

参 考 文 献 / References

- 黄延章,于大森. 微观渗流实验力学及其应用. 北京:石油工业出版社,2001:14~16.
- 苗胜,张发强等. 核磁共振成像技术在油气运移路径观察与分析中的应用. 石油学报,2004,25(3):44~47.
- 肖立志等,岩心的核磁共振微成像及其应用. 江汉石油学院学报,1994,16(1):29~41.
- 张发强,罗晓容,苗盛等,2004. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析,地质科学,39(2):159~167.
- Catalan L, Xiao W F, Chatzis I, Francis A, Dullien L. An experimental study of secondary oil migration. AAPG Bull., 1992, 76: 638~650.
- Dembicki H J, Anderson MJ,1989. Secondary migration of oil;Experiments supporting efficient movement of separate buoyant oil phase along limited conduits. AAPG Bull., 73(8):1018~1021.
- England D A, Mackenzie A S, Mann D M, Quigley T M, 1987. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface. Journal of Geological Society of London, 114:327~347.
- Harms J C. 1966: Stratigraphic traps in a valley fill, western Nebraska. AAPG Bull., 50: 2119~2149.
- Meakin P., 1991. Invasion percolation in a destabilizing gradient. Physical review A. 46: 3357~3368.
- Schowater T T, 1979. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and ectrapment. AAPG Bull., 63(5):723~760.
- Smith D A. 1966. Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults. AAPG Bull., 50:36(3):374.
- Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration. AAPG Bull., 1995, 79: 19~29.
- Wang W M, Lang D J, Liu W. The application of NMR imaging to the studies of enhanced oil recovery in China. Magnetic Resonance Imaging. 1996,14(5): 951~953.
- Wilkinson. D. 1986. Percolation effects in immiscible displacement. Physiclal Review A. vol. 34, pp. 1380~1391.

图 版 说 明 / Explanation of Photos

1. 油气运移通道上的平均含油饱和度变化。横坐标为玻璃管宽度(以像素为单位),纵坐标为油气运移通道上含油饱和度。每两个像素之间的距离为 0.32mm。
 2. NMR(核磁共振)2D 运移示意图。从左到右的粘土含量分别为:0%、5%、10%和 20%,图中亮色的表示油,暗色的表示水和孔隙介质。该图中油运移的方向是从上往下。(a) 初始运移部分;(b) 运移通道部分;(c) 顶部聚集部分。
 3. 整个玻璃管中的不同粘土含量条件下含油饱和度的变化规律。图中横坐标为沿垂直油运移方向上油的累计量(以像素点累计)。纵坐标为玻璃管的长度,单位为 cm。这里,顶部位油气运移的初始部分,而下部是油聚集的部分。
1. The vary of the mean oil saturation in pathway. The width of the glass column is taken as horizontal axis and the oil saturation is taken as the ordinate. The distance between two pixel is 0.32mm.
 2. The sketch map for the oil migration taken by NMR(Nuclear Magnet Resonance) equipment. In this figure the contain of the clay are 0%,5%,10%,20% from left to right. The white part is the oil and the black part is the water. The migration direction

start from the top of the figure. (a) Initial part; (b) pathway part; (c) top part.

3. The vary of the oil saturation in different clay contain. The count of the oil along the vertical direction is taken as the horizontal axis

(unit by the number of pixel) and the length of the glass column is taken as the ordinate. The top of the figure is the initial part and the bottom of the figure is the accumulation part.

The Quantitative Analyze of the Effect of Clay Matters on Secondary Oil Migration in Nuclear Magnet Resonance Technology

ZHOU Bo^{1,3)}, , LUO Xiaorong²⁾, , WANG Yi¹⁾

1) *Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing, 100083*

2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academe of Science, Beijing, 100029*

3) *Resources College, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

Abstract

In this article the Nuclear Magnet Resonance (NMR) image technology is applied to analyze the oil saturation in the secondary oil migration process. It is the first time that the oil saturation variation are observed when the clay matter exists in the glass beads porous media. Based on the experiment data, it is concluded that: (1) the secondary oil migration pathway is inhomogeneous and the oil saturation increase with the content of the clay. At the same time the remain oil in the original oil column increases. (2) Because the remain oil increase both in pathway and in original oil column, it is obvious that the clay, which exist in the glass beads, make the remain oil increases. This decrease the oil migration efficiency and is harm to the oil accumulation.

Key words: Oil Migration; Clay; NMR(Nuclear Magnet Resonance); Saturation