气水两相渗流及封闭气的形成机理实验研究 *

周克明 * *　　李　宁　　张清秀　　唐显贵

(中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院)

周克明等. 气水两相渗流及封闭气的形成机理实验研究. 天然气工业 ,2002 ;22(增刊) :122～125

摘　要　四川盆地天然气藏多数属于有水气藏。随着气藏的不断开发 ,地层压力不断下降 ,导致了边水推进和底水上升 ,严重影响了天然气的产量和气藏的采收率。四川盆地天然气藏地质情况复杂 ,储层非均质性强 ,水侵形式多种多样 ,开发难度极大。本文根据四川盆地有水气藏的实际情况 , 以铁山 2 井 3 号样品和卧 116 井 114 号样品的铸体薄片所代表的孔隙结构为背景 ,利用现代激光刻蚀技术 ,研制了均质孔隙和裂缝 —孔隙模型地层的气水两相可视化人工物理模型。开展了气水两相渗流及封闭气形成机理试验 ,研究了两种模型中的水驱气机理 ,水沿裂缝的推进和变化规律 ,封闭气的形成方式 ,气水两相的微观分布关系以及尽量采出封闭气的主要方法。

主题词　四川盆地　气藏　裂缝　两相流动　封闭气　水驱气

人工物理模型的研制

多孔介质中气水两相渗流的数学模型主要有毛细管束模型、统计模型、经验模型和网络模型[1]。但四种模型都不能真实反映岩石的孔隙结构 ,当然也不能反映岩石中的气水两相渗流特征。

怎样将岩石的真实孔隙结构复制成一个实物模型 ,并且利用实物模型开展气水两相渗流试验 ,是本文研究的技术关键。

本文采用以裂缝为主的铁山 2 井 3 号样品和以粒间孔为主的卧 116 井 114 号样品的铸体薄片照片所代表的孔隙结构作为制作物理模型的基础 ,利用先进的激光刻蚀技术 ,将岩石的真实孔隙结构在光学玻璃板上刻蚀出来 ,制作成可供摄像用的透明微观物理模型 ,这是建立和制作微观气水两相渗流物理模型的基础。

模型的优点 :真实地反映了岩石的孔隙结构特征 ,可以通过显微摄像直观地观察到流体在多孔介质中的流动过程。更深刻地揭示和反映了岩石的孔隙结构与流体驱替过程、流体分布、封闭气的形成方式及渗流特征之间的关系。均质孔隙模型和裂缝 —孔隙模型代表的孔隙结构分别见图 1 和图 2。

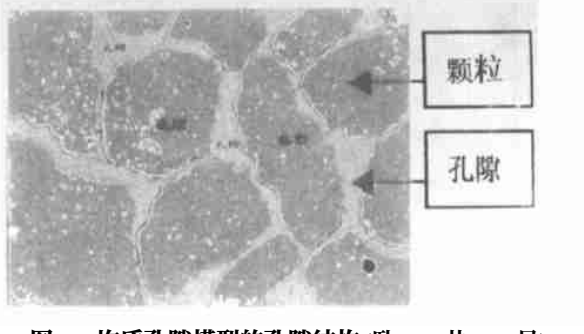

图 1　均质孔隙模型的孔隙结构(卧 116 井 114 号)

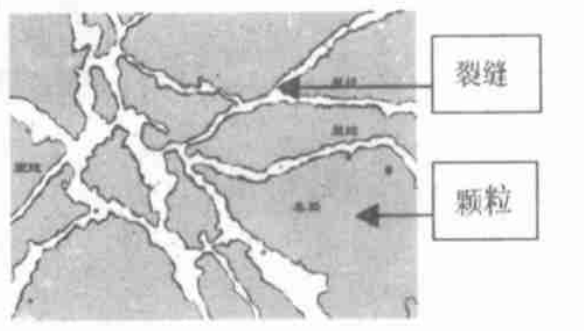

图 2　裂缝 —孔隙模型的孔隙结构(铁山 2 井 3 号)

* 本文系中国石油天然气集团公司“九五”攻关项目(970506 - 02 - 01 - 01)的部份内容。

* * 周克明 ,1963 年生 ,高级工程师 ,1985 年毕业于西南石油学院开发系。集团公司油气田开发试验分标委委员 ,一直从事油气田开发试验工作 ,发表学术论文 10 余篇。地址 :(610051) 四川省成都市府青路一段 1 号。电话 :(028) 86015598。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

微观孔隙模型的水驱气试验

实验现象:卧 116 井 114 号样品所代表的孔隙结构以连通的粒间孔隙为主,其孔隙结构见图 1。实验用水为蒸馏水加甲基红,模型亲水。以粒间孔为主的储层其渗流能力主要受喉道的大小及分布控制,与裂缝型模型相比,毛管阻力相对较大,驱替压力也相对较高,达 0.1 MPa。在 0.1 MPa 的驱替压差下,由于模型亲水,水首先沿较小的孔道表面进入孔隙,其结果几乎可以占据所有小孔隙和小喉道。相反,在大孔隙大喉道中,水的渗流速度相当慢,依靠毛细管力作用,水要完全占据一个大孔隙,并且将其中的气体排出,不仅要积聚相当的能量,而且需要较长的时间。在驱替压差不大的情况下,无论是孔隙还是喉道,气水分布及流动方式主要表现为水包气。水沿管壁流动,气体在孔道中央流动。均质孔隙模型的气水分布关系见图 3。

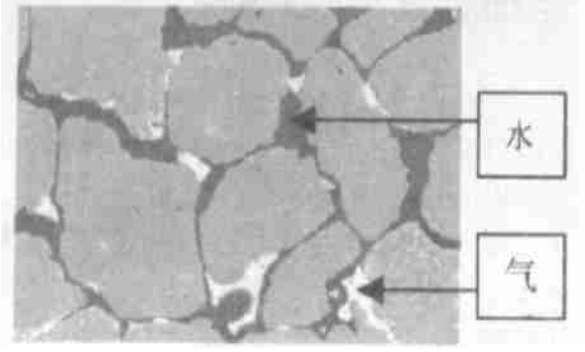

图 3　均质孔隙模型的气水分布关系

以铁山 2 井 3 号样品所代表的孔隙结构为基础,制作了二个裂缝—孔隙模型(1 号模型和 2 号模型)见图 2。实验过程中,1 号模型采用蒸馏水加甲基红作为驱替介质,2 号模型采用蒸馏水加甲基兰作为驱替介质。由于裂缝—孔隙模型的渗透率比均质孔隙型模型高,所以裂缝—孔隙模型的水驱气压力比均质孔隙模型相对低得多。其中 1 号模型的初始驱替压力为 20 kPa,2 号模型的初始驱替压力为 40 kPa(均质孔隙模型达 0.1 MPa)。

在裂缝—孔隙模型当中,由于裂缝是主要的渗流通道,并且裂缝比均质孔隙中的喉道具有更高的渗流能力,因此在裂缝—孔隙模型中,水进入模型后,便以极快的速度在模型中沿裂缝发生水窜。在大约 5 cm 长的模型当中,从模型入口到出口,水窜时间在 10 秒以内完成。而均质孔隙模型在 0.1 MPa 的驱替压差下,至少需要 40 分钟甚至更长。水窜速度如此之快,原因一是模型具有亲水性;二是驱替压差相对较高;三是裂缝的渗流阻力太小。试验表明:裂缝是产生水窜的客观条件,压差是产生水窜的真正动力。只要合理控制气水边界处的压差,便可以有效降低水窜速度。

由于裂缝—孔隙模型具有亲水性,当水窜入模型后,水总是沿裂缝表面流动。在水窜没有达到模型出口时,水可以将裂缝中的大量气体驱出,同时在裂缝弯曲和缩颈部位发生卡断现象,将部分气体滞留下来。当水窜到达模型出口时,气水分布具有如下特征:①在大裂缝中,水有可能占据全部渗流通道,从气水局部分布关系看,气体无法经过大裂缝流动;②在中小裂缝中,水往往沿裂缝表面流动,气体在裂缝中央形成气体心子或气体段塞和珠泡,水成连续相,气成不连续相;③在微裂缝和孔隙中,水仍然分布在孔隙和裂缝表面,且以连续相的形式存在。气体只能通过卡断的形式以珠泡状留存下来,比较孤立。裂缝—孔隙模型中的气水分布关系见图 4。

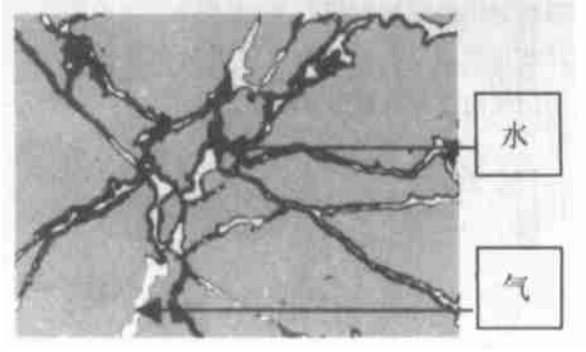

图 4　裂缝—孔隙模型的气水分布关系

水驱气封闭气的形成方式

1. 指进形成的封闭气

在均质孔隙模型中驱替压差相对较低时,毛细管力成为气水流动的主要动力,指进现象是形成封闭气的主要原因。当水进入两条大小不同的孔道后,在毛细管力的作用下水以较快的速度进入较小的孔道。由于孔道中气体的体积较小,水的渗流速度较快,在小孔道中,气被很快驱出,水在模型出口处很快突破。但是在大孔道中由于毛细管力较小,水的渗流速度较慢,其结果是当小孔道中的水发生突破后,便将大孔道中的气封闭起来,形成封闭气。

当驱替压差较大,惯性力起主要作用时,气水两相流动机理正好与毛细管力作为动力时相反,其最终结果是水在大孔道中首先发生突破而将小孔道中的气封闭起来。此时小孔道中形成的封闭气很难再进一步采出。水驱气试验表明,指进是均质孔隙模

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型中主要的气水两相渗流特征,其气水分布关系及形成的封闭气见图 5。

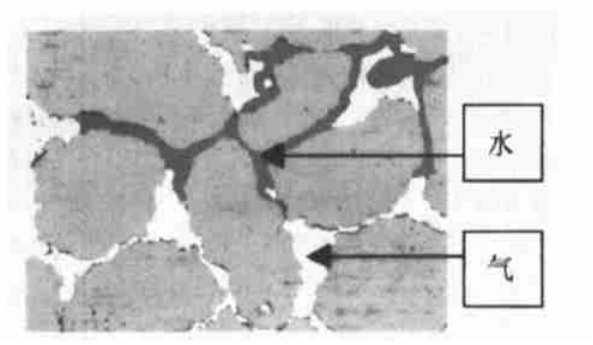

图 5　均质孔隙模型中指进形成的封闭气

与均质孔隙型模型一样,在裂缝—孔隙模型中,指进也会形成大量的封闭气。由于裂缝具有很高的导流能力,在较低的驱替压差下,水就会窜入较大的裂缝,以较快的速度发生水窜,其结果会将许多孔隙和微裂缝中的气体封闭起来,见图 6。试验表明:均质模型与裂缝—孔隙模型在较低的驱替压差下,形成封闭气的渗流机理正好相反。

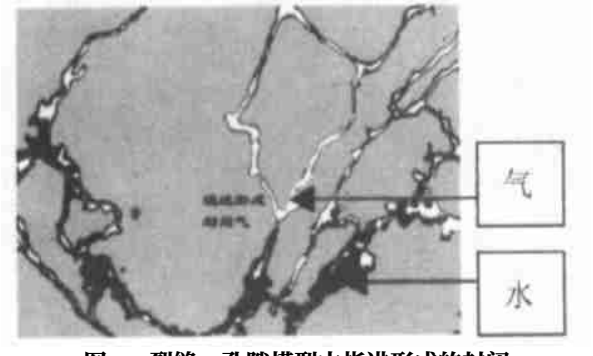

图 6　裂缝—孔隙模型中指进形成的封闭

2. 卡断形成的封闭气

卡断是形成封闭气的又一主要原因。当气水两相流经狭窄喉道时,由于贾敏效应产生附加阻力。另一方面由于岩石的亲水性,水沿孔喉表面流动而形成水膜,造成水锁损害,使流动阻力进一步加大。此时气体经过喉道处发生"收缩—变形—再膨胀"过程,使得连续流动的气流在喉道出口处发生卡断。卡断形成的封闭气以珠泡状的形式停留在孔道中央,见图 7。

由于裂缝孔隙模型具有亲水性,水窜入裂缝后,总是沿裂缝和孔隙表面流动,气体占据孔道中央流动。在比较粗糙的裂缝表面和孔隙喉道变形部位,由于贾敏效应产生附加阻力,这种阻力也会使连续流动的气体发生卡断现象而形成封闭气,见图 8。试

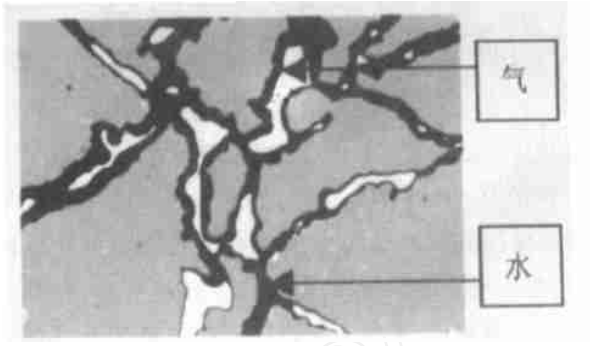

图 7　孔隙中卡断形成封闭气

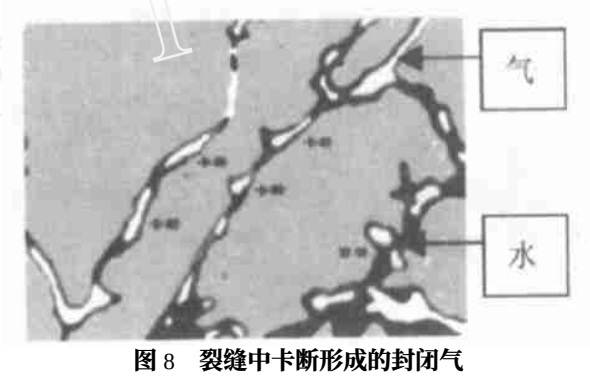

图 8　裂缝中卡断形成的封闭气

验表明:提高驱替压差,在水动力作用下,卡断形成的封闭气可以进一步采出。另一方面,降低模型出口压力(相当于降低井底压力),卡断形成的封闭气产生较大规模的膨胀和聚并,利用自身的膨胀能量可以将其采出。

降低出口压力和提高驱替压差,采出卡断形成的封闭气具有不同的渗流机理。降低出口压力,虽然驱替压差也相应提高,但是降低出口压力的结果,主要是使封闭气发生膨胀和聚并,并依靠自身的膨胀能量作为驱动能量。而提高驱替压差,其主要作用是依靠惯性力作为驱动能量。同时提高驱替压差,封闭气进一步受到压缩,在喉道处和在粗糙的裂缝表面,产生卡断现象的机会降低,提高了气泡连续流动的能力。因此,提高驱替压差和降低出口压力采出封闭气的机理是不同的。

3. 孔隙盲端、角隅形成的封闭气

孔隙盲端、角隅总是会形成一定数量的封闭气。在多孔介质中存在大量的死孔隙,尽管样品具有亲水性,但是很难将死孔隙中的气体驱出,尤其在流动通道上的压力高于孔隙中的气体压力时,这部分气体根本无法采出。试验表明:通过提高驱替压差不能将死孔隙中的封闭气采出。因为提高驱替压差,实际上是表现为地层压力升高,这时死孔隙和盲端中的气体受到压缩而进一步向孔隙和盲端深处退

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 9　孔隙盲端形成的封闭气

缩。要采出死孔隙中的封闭气,只有降低气藏废弃压力。盲端形成的封闭气见图 9。

4.“H 型”孔道形成的封闭气

均质孔隙模型中形成封闭气的另一个主要原因是“H 型”孔道。在均质孔隙模型中,“H 型”孔道形成的封闭气占比例较大。“H 型”孔道形成封闭气的主要机理具有两个方面:一方面是由于水的指进优先突破两条边向前流动;另一方面是由于气体的压缩性,当两边的水通过后,水进一步靠模型的亲水性进入“H 型”孔道的桥,将桥上的气体压缩成泡状而成封闭气。“H 型”孔道形成的封闭气见图 10。

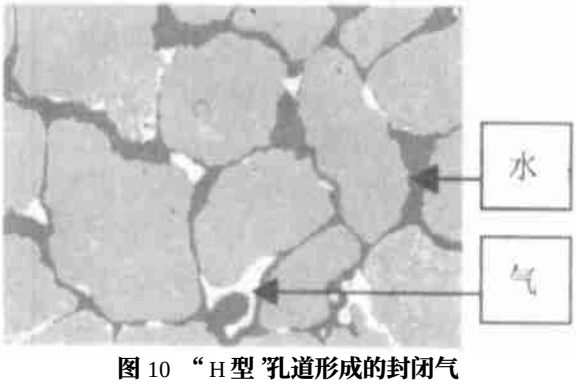

图 10　“H 型”孔道形成的封闭气

“H 型”孔道形成的封闭气可以通过二种途径采出。一是降低气藏废弃压力,让桥上的气体充分膨胀后,在水动力的作用下被带出。二是提高驱替压差,打破“H 型”孔道两边的压力平衡而将桥上的气体采出。进一步试验表明,提高驱替压差,“H 型”孔隙中形成的封闭气采出很彻底。

通过两个模型的反复试验表明:一旦气藏发生水窜,井底见水,要维持气井产量,提高气藏采收率,应提高驱替压差或提高排水强度才是较为理想的采气方式。

5. 水锁现象

通过激光刻蚀微观物理模型的水驱气试验表明,水锁也是多孔介质中主要的两相渗流特征。在储层没有发生水侵之前,多孔介质中只有单相气体流动,渗流阻力相对较低。当储层发生水侵后,多孔介质中单相流动变为多相流动,这时气水的渗流阻力明显增大,造成水锁损害。在原始状态下,储层孔喉中存在一定数量的束缚水,束缚水主要以水膜的形式存在。在实验过程中,样品发生水侵后,其孔隙和喉道表面的水膜增厚,使气水两相渗流通道减小,增加了两相渗流阻力。由于储层的亲水性,水膜总是以连续相分布在孔喉表面,而气体在孔喉中央流动,其流动阻力与水相相比则大得多。所以,一旦储层发生水侵或水窜,气体产量将会急剧降低,这种现象在实际生产中十分普遍。

结论与认识

通过本文的研究,利用现代激光刻蚀技术,研制了均质孔隙和裂缝—孔隙模型地层的气水两相可视化人工物理模型。利用研制的物理模型开展了气水两相渗流机理试验,并研究了两种模型当中的水驱气机理,水沿裂缝的推进和变化规律,封闭气(滞留气)的形成方式,气水两相的分布关系以及尽量采出封闭气的主要方法,取得了以下认识:

1) 在均质模型中,由于水侵作用形成封闭气的主要原因是指进、卡断和贾敏效应,不连通孔隙和孔隙角隅以及“H 型”孔道也会形成大量的封闭气。

2) 裂缝—孔隙模型中,由于水窜作用会形成大量的封闭气。由于模型的亲水性,指进、卡断是形成封闭气的主要原因。孔隙盲端和连通性较差的孔隙也会形成大量的封闭气。

3) 卡断、指进以及“H”型孔道形成的封闭气可以通过提高驱替压差和降低井底压力将其采出。均质孔隙中小孔道形成的封闭气通过提高驱替压差很难采出。

4) 死孔隙中形成的封闭气只能通过降低井底压力或气藏废弃压力才能采出。

参 考 文 献

1　杨富民、黎用启. 多孔介质—流体渗移与孔隙结构. 北京:石油工业出版社,1990

(收稿日期　2001 - 12 - 08　编辑　黄君权)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Wang Li, Zhang Dihong, Xiang Xinhua and Liu Tong (Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Branch, PCL).
NATUR. GAS IND. v. 22, supplementary issue, pp. 118～121, 5/25/2002. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: Various factors influencing natural gas hydrate formation were studied in laboratory, including gas composition, temperature, pressure, water saturation, ion concentration, gas stirring and carbon dioxide gas, etc. Through analyzing the experimental data and results, either positive or negative influences of these factors on natural gas hydrate formation and their influence degrees were determined, thus achieving a deep-going understanding of its formation conditions, which is of directly guiding significance for solving on-the-spot production problems.

SUBJECT HEADINGS: Natural gas, Hydrate, Temperature, Pressure, Ion, Concentration, Acidic gas, Water saturation

Wang Li *(female, engineer)*, born in 1973, graduated with a Master's degree in oil and gas field development engineering from the Southwest Petroleum Institute in 1997. Now she is engaged in the research on formation fluid phase state and natural gas hydrate. Add: No. 1, Section 1, Fuqing Road, Chengdu, Sichuan (610051), China Tel: (028) 86015598

……

EXPERIMENTAL RESEARCH ON GAS-WATER TWO PHASE FLOW AND CONFINED GAS FORMATION MECHANISM

Zhou Keming, Li Ning, Zhang Qingxiu and Tang Xiangui (Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Branch, PCL).
NATUR. GAS IND. v. 22, supplementary issue, pp. 122～125, 5/25/2002. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: Most of the natural gas reservoirs in Sichuan Basin are the water-carrying gas reservoirs. The edge water incrusion and bottom water coning were caused by an unceasing decrease of formation pressure because of the successive production of the gas reservoir, which influences the gas yield and gas reservoir recovery seriously. It is very difficult to develop the gas reservoirs in Sichuan Basin on account of complicated geological conditions, super heterogeneous reservoirs and various water incrusions. According to the practical situation of the water-carrying gas reservoirs in Sichuan Basin, by taking the pore structures, represented by the cast thin sections of the sample No. 3 of the well Tieshan-2 and the sample No. 114 of the well of Wo-116, as the background, two visualized artificial physical models of gas-water two phase flow in the homogeneous pore model stratum and fracture-pore model stratum were developed by use of modern laser engraving technique. The experiments of gas-water two phase flow and confined gas formation mechanism were carried out, in which the water-drive gas mechanism in the two models, the moving and change rules of water along fractures, the confined gas formation pattern, the micro distribution relation between gas and water, and the major methods of recovering confined gas with all our exertions were studied by the authors.

SUBJECT HEADINGS: Sichuan Basin, Gas reservoir, Fracture (rock), Tow phase flow, Confined gas, Water-drive gas

Zhou Keming *(senior engineer)*, born in 1963, graduated in development engineering at the Southwest Petroleum Institute in 1985. He is a member of the Analysis Standard Committee of Oil and Gas Field Development Experiment. He is always engaged in the experimental work of oil and gas field development and published more than ten articles. Add: No. 1, Section 1, Fuqing Road, Chengdu, Sichuan (610051), China Tel: (028) 86015598

……

ESTABLISHING OIL AND GAS EXPLORATION AND DEVELOPMENT DATABASE ON THE BASIS OF GIS

Gou Xuemin, Chen Jigao, Zhang Huayi, Dang Litang and Wang Fuyong (Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Branch, PCL).
NATUR. GAS IND. v. 22, supplementary issue, pp. 126 ～ 129, 5/25/2002. (ISSN1000 - 0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: It is a brand new try to introduce the Geographic Information System (GIS) into oil and gas exploration and development database establishment. As compared with the conventional relational database, the GIS database has a great deal of merits. Its principle merits include the diversification of information memory and input (including data, file, image and voice, etc.), the diagramming of search interface, the tooling of search method and the simplification of demand for user's quality. Therefore it is convenient to be utilized and easy to be popularized. All the virtues have been realized in the oil and gas exploration and development database established by the authors. Because the message exchange quantity is very large owing to involving the image processing and transmission, the Client/Server structure of the thin client is generally adopted for such a kind of database in remote access, and the technique of so-called "database file version up" is necessary to be applied in database maintenance. As long as the user needs, a secondary development of the software may be carried out soon.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net