

气田开发

应用常规压汞和恒速压汞实验方法 研究储层微观孔隙结构 ——以三塘湖油田牛圈湖区头屯河组为例

朱永贤^{1,2}, 孙卫³, 于锋²

- (1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国石油吐哈油田分公司三塘湖采油厂, 新疆 哈密 803009;
3. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要:吐哈油区三塘湖油田牛圈湖区头屯河组砂岩储层主要为岩屑砂岩, 平均孔隙度为 19.7%, 平均渗透率为 $77.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 孔隙类型主要以粒间孔为主, 粒间溶孔、长石溶孔和岩屑溶孔次之, 碳酸盐溶孔和杂基溶孔很少。通过铸体薄片、扫描电镜、常规高压压汞、恒速压汞等实验手段认识到, 研究区砂岩储层的微观孔隙结构复杂, 非均质性较强, 注水开发水驱油效率差; 这主要是由储层的微观非均质性较强所致。

关键词:孔隙结构; 恒速压汞; 牛圈湖区; 头屯河组

中图分类号: TE321

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2008)04-0553-04

0 引言

三塘湖盆地位于新疆维吾尔自治区东北部, 北与蒙古接壤, 夹持于阿尔泰山系与莫钦乌拉—克拉麦里山系之间。牛圈湖区位于中央坳陷带马朗凹陷内的牛圈湖构造带上, 构造带总体呈近东西向展布, 该构造带位于马朗复式向斜北东翼上, 是受近东西向断裂控制的鼻状构造^[1-9]。

三塘湖油田牛圈湖区头屯河组为近年来吐哈油田油气勘探开发新的突破点, 经对开发试验区注水效果分析, 表明水驱油效率和注水开发效果不理想, 为研究其原因, 笔者依据该储层孔隙结构多样、非均质性强、油水关系分布复杂的特点, 在储层孔隙结构镜下分析研究的基础上, 采用常规高压压汞和先进的恒速压汞实验方法对牛圈湖头屯河组的微观孔隙结构进行分级定量实验对比分析。

1 储层微观孔隙结构特征

据岩心分析资料统计显示, 三塘湖油田牛圈湖

区头屯河组储层孔隙度为 5.7%~23.6%, 平均为 19.7%; 渗透率为 $(0.09 \sim 461.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $77.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属中孔、中渗储层^[10-13]。研究区储层岩性致密, 颗粒分选中—好, 70%以上粒级分布为中—细砂岩。平均面孔率为 9.12%。胶结类型为孔隙—薄膜型, 磨圆度为次棱角状。

1.1 孔隙类型

研究区砂岩储层孔隙类型主要以粒间孔为主, 占总孔隙含量的 65.5%左右, 而长石溶孔和岩屑溶孔次之, 分别占总孔隙含量的 10.5%和 7.5%, 碳酸盐溶孔和杂基溶孔很少。

(1) 粒间孔(图 1a、图 1b): 研究区砂岩储层由于成岩压实及自生胶结作用的改造强度中等, 所以大部分粒间孔都被保留了下来, 且均匀分布于储层中, 是主要的油气储、运空间, 对储层孔隙度贡献最大。其孔径相对较大, 大小不一, 形态较规则, 多呈多边形。是研究区砂岩储层最主要的储集空间之一。

(2) 长石溶孔(图 1c): 长石溶孔是长石颗粒部分或全部受溶形成的溶蚀孔隙, 溶孔具长石颗粒的

短柱状晶体轮廓,局部偶见未完全溶蚀的残余,长度大小为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 。此类孔隙类型在研究区较为发育,对储层有效孔隙贡献较大。

(3)岩屑溶孔(图 1d):孔径一般在 $100\sim 150\ \mu\text{m}$ 之间,局部具有肉眼可见的大溶孔,孔径达 $300\ \mu\text{m}$ 以上,由岩屑颗粒部分溶蚀或全部被溶而成,当颗粒完全被溶时,多有丝缕状残余物显示出颗粒轮廓,与周围粒间孔一起构成明显超过邻近颗粒尺寸的“超粒大孔”。

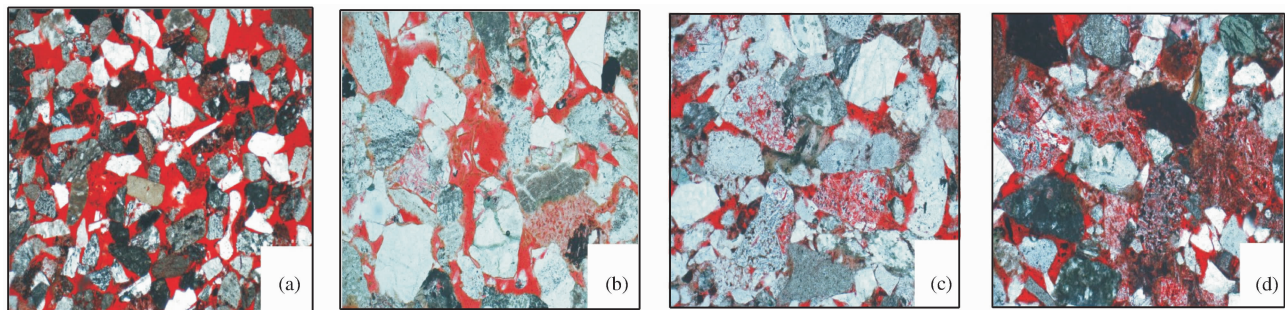


图 1 研究区储层铸体薄片照片

- (a) 湖 33-11 井, 1 230.30m, $\times 50$, 大量粒间孔隙发育; (b) 湖 33-11 井, 1 106.10m, $\times 100$, 粒间溶孔发育;
(c) 湖 33-11 井, 1 170.72m, $\times 100$, 长石溶孔; (d) 湖 33-11 井, 1 170.72m, $\times 100$, 大量火山碎屑溶蚀成孔

2 常规高压压汞研究

牛圈湖区头屯河组属于中孔中渗储集层,储集层的微观非均质性相对较强,针对研究区砂岩储层的孔隙结构特征,选取头屯河组储层的 32 块岩心样品进行了常规高压压汞实验。根据曲线的歪度、分选性等特征参数将曲线分为以下 4 类(图 2):

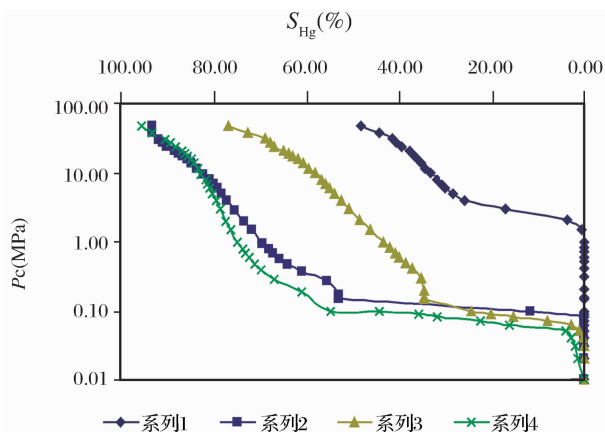


图 2 不同毛管压力曲线

(1)系列 1:分选中等,其孔喉分选系数平均值为 1.381,喉道半径较为集中,汞主要集中在半径为 $0.1\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的喉道所控制的孔隙空间内,渗透率较低($0.086\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)。铸体薄片观察该样品孔隙空间大量被方解石胶结,此类别主要发育于头屯河组顶部,且局部发育。

1.2 孔喉结构

依据 32 块样品压汞实验结果:牛圈湖区头屯河组储层孔喉中值半径最大为 $7.350\ \mu\text{m}$,最小为 $0.0211\ \mu\text{m}$,平均为 $1.574\ \mu\text{m}$,分选系数平均为 2.798,变异系数平均值为 0.268,平均中值压力为 9.698 MPa,平均排驱压力为 0.327 MPa,退汞效率平均为 17.9%。可见研究区砂岩储层具有分选较好、中值半径较小、中值压力大的特点。

(2)系列 2:分选差,样品的孔喉分选系数平均值为 2.898,汞主要集中在半径为 $4.9\sim 9.0\ \mu\text{m}$ 的喉道所控制的孔隙空间内,渗透率主要集中在 $(50\sim 80)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的范围内。

(3)系列 3:分选较差,样品的孔喉分选系数平均值为 3.624,汞主要集中在半径为 $4.8\sim 18.30\ \mu\text{m}$ 的范围内,通过铸体薄片观察,样品大量发育溶蚀次生孔隙,且次生孔隙连通性较好,增强了储层的渗透性。

(4)系列 4:分选差,样品的汞半径主要集中范围相对较广($1.00\sim 35.00\ \mu\text{m}$),渗透率值变化范围也相对较大($6.081\times 10^{-3}\sim 461.81\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)。但都遵循喉道分布范围宽、大喉道比例高则样品的渗透率相对就高的原则。

3 恒速压汞研究

为了实现对喉道数量的测量,克服常规压汞实验对研究储层微观孔隙结构的不足,此次研究又选取研究区砂岩储层具有代表性的 2 块岩心样品,进行恒速压汞实验。

恒速压汞实验通过检测汞注入过程中压力涨落将岩石内部的喉道和孔隙分开,不仅能够分别给出喉道和孔隙各自的发育情况,而且能够给出孔喉比的大小及其分布特征。与常规压汞相比,恒速压汞不仅能够提供更多的岩石物性参数,而且能够提供

更详细的定量信息，能够明显区分岩样之间孔隙结构上的差异性。克服了常规压汞对应同一毛管压力曲线会有不同孔隙结构的缺陷。

针对研究区砂岩储层的孔隙结构特征，选取头屯河组储层的2块物性相对较好的岩样(90号样品、302号样品)进行了恒速压汞实验。

依据样品恒速压汞实验结果，三塘湖油田牛圈湖区头屯河组储层的平均孔隙体积为44.16 mL，平均毛管半径为5.551 μm ，饱和度中值压力为0.719 MPa，饱和度中值半径为1.997 μm ，最终进汞压力为6.197 MPa。

(1)如图3所示的研究区2块岩样的有效喉道半径分布特征，其喉道半径最大值都在15 μm 的范围内，喉道半径加权平均值分别是7.210 μm 和7.005 μm 。并且岩样的有效喉道半径分布均呈多峰特征。低值喉道半径相对大量存在，增加了储集

层的微观非均质程度，造成了研究区注水开发中砂岩储层中大量剩余油残留于储集空间。

(2)如图3所示的研究区2块岩样的有效孔隙半径分布特征，其孔隙半径最大值都在350 μm 的范围内，孔隙半径加权平均值分别是190.37 μm 和188.08 μm 。且岩样的有效孔隙半径分布均较为集中，主要分布在130~230 μm 的范围内。说明研究区砂岩储层的微观非均质性主要由喉道的非均质性引起。

(3)如图3所示的研究区2块岩样的孔隙半径/喉道半径分布特征，其孔隙半径/喉道半径主要分布于20~60 μm 的范围内。岩样的孔喉半径比分布特征反映了岩样及储集层微观渗流能力的高低。目的层岩样中较多大孔隙被小喉道所控制，大孔隙内的油难以流经小喉道被采出，从而造成注入水驱油效率较低。

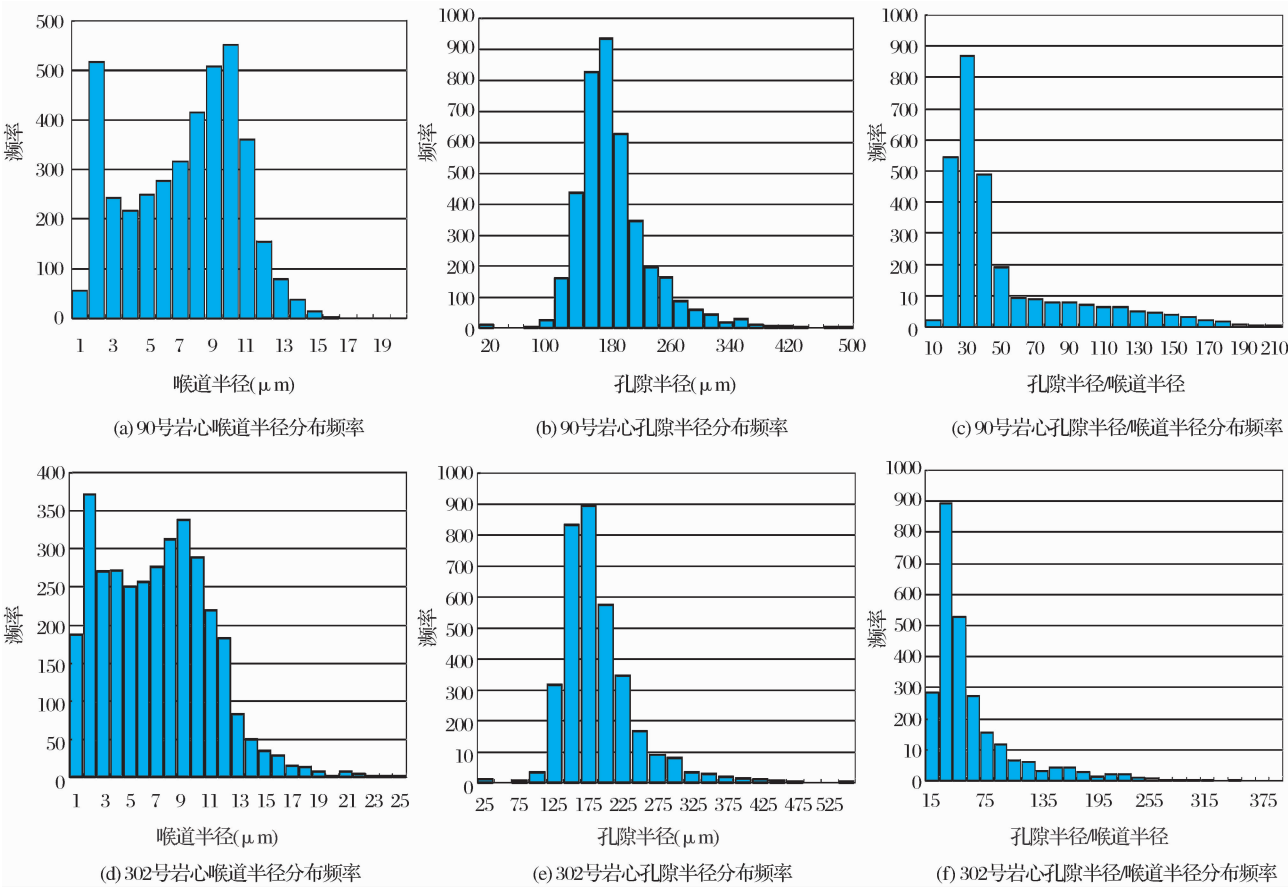


图3 恒速压汞实验结果

4 结论

(1)研究区砂岩储层平均孔隙度为19.7%，平均渗透率为 $77.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。铸体薄片和扫描电镜分析表明，研究区砂岩储层孔隙类型主要以粒间孔

为主，粒间溶孔、长石溶孔和岩屑溶孔次之，碳酸盐溶孔和杂基溶孔很少。

(2)研究区砂岩储层孔隙半径平均值为88.66 μm ，喉道半径集中分布在1~20 μm 的范围内。根据孔隙喉道分类结果可以看出，研究区砂岩储层属

于中孔隙、细喉道和中喉道类型。

(3)通过常规高压压汞实验分析知,储层中的最大孔喉是决定和改善渗透率的重要因素。渗透率高的储层,大孔喉区域峰值高,较少数量的大孔喉贡献了渗透率的绝大部分;孔隙结构越复杂的岩样,其退汞效率越低,孔隙空间中残留了大量的汞。为提高退汞效率,需要缓慢降压,与注水开发中的低速注水保持油相的连续性相对应。

(4)对研究区砂岩储层恒速压汞实验分析表明,研究区2块岩样的有效喉道半径分布均呈多峰特征,其孔隙半径最大值都在350 μm 的范围内,说明研究区砂岩储层的孔隙分布较为集中。储集层非均质性主要由喉道非均质性所致。岩样中较大孔隙被小喉道所控制,大孔隙内的油难以流经小喉道被采出,从而造成驱油效率较低。

参考文献:

- [1] 王昌桂,杨飏. 三塘湖盆地油气勘探前景[J]. 新疆石油地质, 2002,23(2):92-94.
- [2] 唐勇. 三塘湖盆地牛圈湖油田西山窑组储集层特征及评价[J]. 新疆石油地质,1998,19(6):493-497.
- [3] 张宏,包建平,江凤梅. 三塘湖盆地侏罗系烃源岩倾油倾气性探讨[J]. 天然气地球科学,2006,17(2):183-186.
- [4] 孙自明,熊保贤,李永林,等. 三塘湖盆地构造特征与有利勘探方向[J]. 石油实验地质,2001,(1):23-26.
- [5] 黄斌,徐晓山. 新疆三塘湖盆地塘参1井晚侏罗世齐古组孢粉组合[J]. 古生物学报,2004,43(2):262-280.
- [6] 杜宏宇,王志勇,金颖,等. 三塘湖盆地天然气成因及成藏分析[J]. 天然气地球科学,2006,17(4):582-585.
- [7] 李红,柳益群,刘延莉,等. 三塘湖盆地条湖、马朗凹陷沉降史分析[J]. 西北大学学报:自然科学版,2004,34(6):721-725.
- [8] 冯乔,柳益群,郝建荣. 三塘湖盆地芦草沟组烃源岩及其古环境[J]. 沉积学报,2004,(3):513-517.
- [9] 高岗,李华明,李川,等. 三塘湖盆地牛圈湖油田地质特征与成藏过程[J]. 新疆石油地质,2006,(5):535-538.
- [10] 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:125-137.
- [11] Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction process s and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(6): 633-642.
- [12] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. AAPG Bulletin, 1973, 5(2): 349-369.
- [13] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:329-332.

Application of High Pressure Hg Injection and Rate-controlled Hg Penetration Experimental Technique to Studying Reservoir Microscopic Pore Structure: Taking Toutunhe Formation in Niuquanhu Area of Santanghu Oilfield as an Example

ZHU Yong-xian^{1,2}, SUN Wei³, YU Feng²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Santanghu Oil Plant of Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami 803009, China; 3. Department of Geology,
Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The Toutunhe sandstone reservoir in Niuquanhu area of Santanghu oilfield is mainly lithic sandstone, with an average porosity of 19.7% and average permeability of $77.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The pore structure types are mainly intergranular pore, secondary are intergranular dissolved pore, feldspar dissolved pore, cuttings dissolved pore, and carbonate dissolved pore is seldom. With the help of casting thin slice, scanning electron microscope, conventional mercury penetration, and rate-controlled mercury penetration, this paper indicates that the microscopic pore structure in the sandstone reservoir is complicated, and the anisotropism here is strong, the water flushing efficiency of the water-flooding is low, it is resulted from the reservoir microscopic anisotropism.

Key words: Pore structure; Rate-controlled mercury penetration; Niuquanhu area; Toutunhe Formation.