

天然气开发

恒速压汞技术在大港油田孔南储层流动单元 微观孔隙特征研究中的应用

王翊超¹, 王怀忠², 李炼民², 于新², 庄红妹²

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059;

2. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280)

摘要:恒速压汞技术不仅可测量喉道数量,而且能同时得到孔道与喉道的信息。利用恒速压汞实验对冲积环境储层不同流动单元微观孔隙特征进行了研究。恒速压汞分析表明:不同流动单元喉道半径和有效喉道体积差别明显;储层孔隙半径差距明显;有效孔隙体积差异并不明显;储层孔喉半径比差异明显;相对而言Ⅲ类流动单元有效孔隙喉道数更多。对于中孔中渗储层来说,影响流体流动能力的因素主要是喉道大小。因此在油气田开发中,应根据不同流动单元的不同微观孔隙结构特征,采取不同的开发策略。应用该方法在孔南地区官195断块取得了较好的开发效果。

关键词:恒速压汞;储层流动单元;孔隙结构特征;流动单元;喉道半径

中图分类号:TE311

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)02-0335-05

引用格式:王翊超,王怀忠,李炼民,等.恒速压汞技术在大港油田孔南储层流动单元微观孔隙特征研究中的应用[J].天然气地球科学,2011,22(2):335-339.

0 引言

大量的勘探开发实践表明,储层的微观孔隙结构直接影响着储层的储集渗流能力,并最终决定着油气藏产能的大小^[1]。孔隙在结构上可以划分为孔道和喉道。目前,压汞技术仍是获取微观孔隙结构定量资料的重要途径。因此以中国石油大港油田南部官195断块为例,在常规压汞实验的基础上,利用恒速压汞试验,确定储层孔喉参数,来推测储集层不同流动单元与孔喉参数的关系,进行储层流动单元微观孔隙特征研究,进而为改善油田开发效果,提高油气采收率提供可靠的地质依据。

1 实验区块不同类型流动单元物性

大港油田南部官195断块,主要含油层位是下第三系孔店组孔一段,储集层以冲积环境的辫状河沉积为主。根据聚类分析,并参照油田地质及开发实际,将冲积环境储层划分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类流动单元^[2-3]。其中,Ⅰ类流动单元是该区内最好

的流动单元,储层质量好、渗透性能强;Ⅱ类、Ⅲ类流动单元的物性依次变差;Ⅳ类流动单元的物性最差,流体在该类流动单元中流动性较差。

压汞测试一直是储层孔隙结构研究的重要手段,由此得到的毛细管压力曲线表征了岩石孔喉大小和分布。取官195断块106个常规压汞样品进行了常规高压压汞实验。这4类流动单元呈现出4种不同的特征(图1)。

Ⅰ类流动单元毛细管压力曲线表现为中间平缓段最长,说明喉道分布集中,分选好,表现为粗歪度特征,最大进汞饱和度为70%~95%;高孔、中高渗型为主要特征,通常渗透率大于 $576 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度大于27.2%,主要分布在河口坝和分支河道中。Ⅱ类流动单元毛细管压力曲线中间平缓段略短,最大进汞饱和度为65%~89%,为偏粗歪度;属于中孔、中低渗型,通常 $303.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < \text{渗透率} < 405.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $25.66\% < \text{孔隙度} < 30.57\%$,主要分布在席状砂和次分支河道中。Ⅲ类流动单元最大进汞饱和度为47%~80%,为偏细歪度;属于

中低孔、低渗型储层,通常 $137 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < \text{渗透率} < 203 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $24.6\% < \text{孔隙度} < 27.5\%$,主要分布在水下分支河道、席状砂中。Ⅳ类流动单元储层中间平缓段最短,分选最差,表现为细歪度,最大进汞饱和度达 $20\% \sim 70\%$;属于中低孔、低渗型储层,孔隙度和渗透率均较低,孔隙度平均为 23.5% ,渗透率平均为 $69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布在河漫沼泽和河道边缘相带。

2 恒速压汞技术在储层研究中的应用

常规压汞实验只是给出了某一级别的喉道所控制的孔隙体积,并没有直接测量喉道数量,因此只能给出喉道半径及对应的喉道控制体积分布。而这个分布由于掺杂了孔道体积的因素,所以并非是准确的喉道分布。而恒速压汞技术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细管压力曲线会有不同孔隙结构的缺陷^[4-6]。

为了能够定量测量孔隙大小、喉道大小及孔喉半径比大小等参数,本文研究取了8块岩心样品进行恒速压汞实验。由于流体在Ⅳ类流动单元中流动性较差,因此本次分别取Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类流动单元岩心来进行实验。

本项恒速压汞实验共分析了8块岩心,深度在 $1\,899.92 \sim 1\,923.18\text{ m}$ 之间,孔隙度为 $25.4\% \sim 29.5\%$,渗透率为 $(63.7 \sim 388) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,8块岩心的岩心资料基本能够代表地层的岩石情况。

2.1 实验方法

实验步骤和方法如下:

(1)岩心洗油;

(2)测量孔隙度、渗透率;

(3)恒速压汞,恒定的进汞速度为 $0.000\,05\text{ mL/min}$,最大进汞压力为 6.2 MPa ,对应的最小喉道半径约为 $0.12\mu\text{m}$ 。

2.2 恒速压汞实验分析

恒速压汞技术实验结果如表1所示,分析实验结果可以得出如下4个方面的认识:

(1)不同类型流动单元喉道半径和有效喉道体积差别明显。

从表1中可看出,Ⅲ类流动单元的喉道半径是

$3.26\mu\text{m}$ 和 $3.32\mu\text{m}$,Ⅱ类流动单元的喉道半径为 $5.02 \sim 7.05\mu\text{m}$,Ⅰ类流动单元的喉道半径是 $8.62\mu\text{m}$,相差非常明显;Ⅰ类流动单元的喉道半径明显大于其他2类流动单元。

单位体积岩样(1 cm^3)内有效喉道体积分别是:Ⅲ类流动单元有效喉道体积平均为 0.07 cm^3 ,Ⅱ类流动单元平均为 0.087 cm^3 ,Ⅰ类流动单元平均为 0.093 cm^3 ,Ⅰ类流动单元有效喉道体积明显大于其他2类流动单元。

(2)不同类型流动单元储层孔隙半径差距明显。

从表1中可看出,Ⅲ类流动单元的孔隙半径在 $164.9 \sim 172.4\mu\text{m}$ 之间,平均为 $168.63\mu\text{m}$,Ⅱ类流动单元的孔隙半径在 $184.1 \sim 192.4\mu\text{m}$ 之间,平均为 $189.0\mu\text{m}$,Ⅰ类流动单元的孔隙半径是 $208.0\mu\text{m}$,3种类型流动单元孔隙半径间相差也非常明显;但是,3种类型流动单元间单位体积岩样(1 cm^3)内有效孔隙体积差异并不明显(在 $0.11 \sim 0.15$ 之间)。

(3)不同类型流动单元储层孔喉半径比差异明显。

储层岩石多孔介质内的孔喉半径比大小对驱油效率有显著影响,当大孔隙被小喉道所控制即孔隙半径与喉道半径的比值较大时,大孔隙内的油难以流经小喉道被采出,此时驱油效率较低,反之,当孔隙半径与喉道半径的比值较小时驱油效率较高。从表1中可看出,所分析8块岩样内,Ⅲ类流动单元的孔喉半径比是 176.3 和 114.5 ,平均为 145.4 ;Ⅱ类流动单元的孔喉半径比在 $56.96 \sim 95.24$ 之间,平均为 78.24 ,Ⅰ类流动单元的孔喉半径比是 67.83 ;显然,3类流动单元间相差非常明显。Ⅰ类流动单元孔喉半径比小得多,表明该类流动单元储层的孔、喉相对分布均匀,同时较其他2类储层孔、喉半径分布均匀得多,喉道半径要大于其他2类储层。

(4)Ⅲ类流动单元单位体积岩样有效孔隙喉道数最多。

从单位体积岩样的有效孔隙喉道个数统计数据上得到了另外一个有意义的信息。一般来说,孔隙喉道数越多,储层物性越好;但是研究区Ⅲ类流动单元的有效孔隙喉道数($4\,852$ 个)比Ⅰ类流动单元($2\,009$ 个)和Ⅱ类流动单元($3\,224$ 个)都多,从孔隙和喉道半径数据可以看出,Ⅲ类储层流动单元的有效孔隙喉道数虽多,但多是细小喉道,同时喉道半径对储层流动能力影响较大,所以该类流动单元储层流动能力并不是很好。因此,对研究区河流冲积环

表 1 8 块岩心恒速压汞微观孔喉分析实验结果统计

流动单元类型	最终进汞饱和度/%			单位体积岩样有效喉道体积/cm ³	有效喉道半径加权平均值/μm	单位体积岩样有效孔隙体积/cm ³	有效孔隙半径加权平均值/μm	单位体积岩样有效孔隙喉道个数	有效孔喉半径比加权平均值
	总进汞饱和度	喉道进汞饱和度	孔隙进汞饱和度						
I	82.06	34.76	47.29	0.093	8.62	0.13	208	2 009	67.83
	81.05	39.07	41.97	0.11	7.05	0.11	192.1	2 514	73.58
	80.04	24.5	55.54	0.062	5.39	0.14	187.7	3 482	95.24
II	81.42	30.37	51.05	0.087	6.84	0.15	192.4	3 167	80.69
	84.6	31.15	53.46	0.088	6.41	0.15	188.8	3 570	56.96
	84.34	33.95	50.40	0.088	5.02	0.13	184.1	3 388	84.75
平均	82.29	31.81	50.48	0.087	6.142	0.136	189.0	3 224	78.24
III	73.83	21.79	52.04	0.064	3.32	0.15	172.4	5 140	176.3
	69.89	26.08	43.81	0.067	3.26	0.11	164.9	4 564	114.5
平均	71.86	23.94	47.93	0.066	3.29	0.13	169.0	4 852	145.4

注:表中的“单位体积岩样”为 1 cm³ 岩样

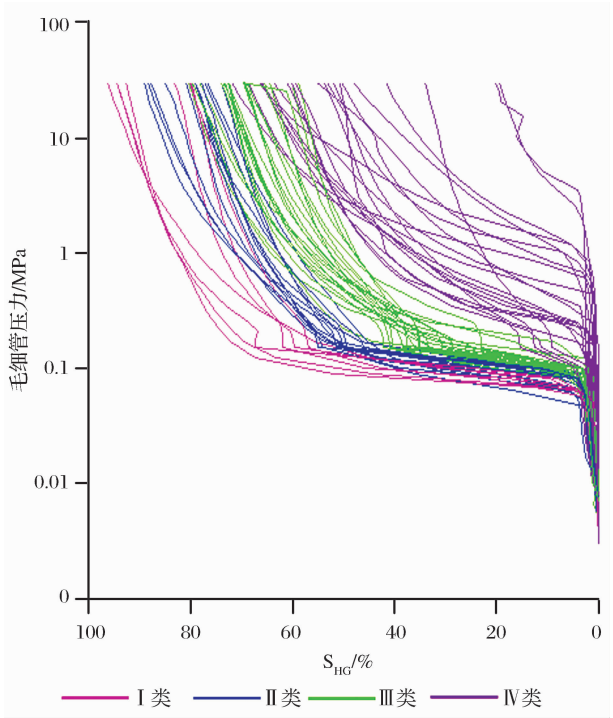


图 1 不同流动单元毛细管压力曲线

境中孔中渗储层来说,影响流体流动能力的因素主要是喉道的大小。

3 不同流动单元生产特征及对策

3.1 生产特征

对官 195 断块 50 多口井枣 V_下 油组生产动态数据统计分析,依据产液剖面和吸水剖面对每口生产过枣 V_下 的油水井进行产量劈分。并将产能和注水量按 4 类流动单元进行了统计。统计表明,I 类、II 类流动单元具有产能和注水量高的特点,反映储

层动用程度高。而 IV 类流动单元产能较低,储层吸水能力差。如油井官 50-6 井,4 种流动单元对其产能贡献率分别为:55.2%、18.20%、20.85% 以及 5.75%;油井官 47-4-2 井,4 种流动单元对其产能贡献率分别为:43.3%、44.1%、9.8%、2.8%。如水井官 50-6 井,注水贡献率中,I 类流动单元为 86.16%,III 类流动单元为 12.37%,IV 类流动单元为 1.47%。然后对油井根据各单砂体产量占单井总累产量百分比将储层分为 4 种类型:主产层(>30%)、产油层(15%~30%)、微产层(0~15%)、不产层;对注水井,根据各单砂体累积注水量占单井总累积注水量百分比也分为 4 种类型:不吸水层、差吸水层(0~20%)、中等吸水层(20%~40%)和好吸水层(>40%)。统计表明,I 类流动单元储层渗流能力强,水驱油效率高,产能贡献大,而 IV 类流动单元储层产能最低(图 2)。

从 4 类流动单元吸水状况看,IV 类流动单元基本以不吸水 and 差吸水层为主(图 3)。

3.2 开发对策

从生产特征来看,由于其喉道分布差异从而导致渗流规律差异,是影响沉积环境储层油田开发特征和开发效果的主要因素,应根据不同流动单元的不同微观孔隙结构特征,采取不同的开发策略。

I 类和 II 类流动单元由于喉道大,采油效果好,油层动用程度高,剩余油主要分布在 III 类和 IV 类流动单元中。这就决定了在挖潜时对 I 类、II 类流动单元通过层间卡封和堵水调剖,挖掘中上部剩余油为主。对于 III 类、IV 类流动单元主要采取补孔和打新井压裂等方式提高储量动用程度。在完善注采系

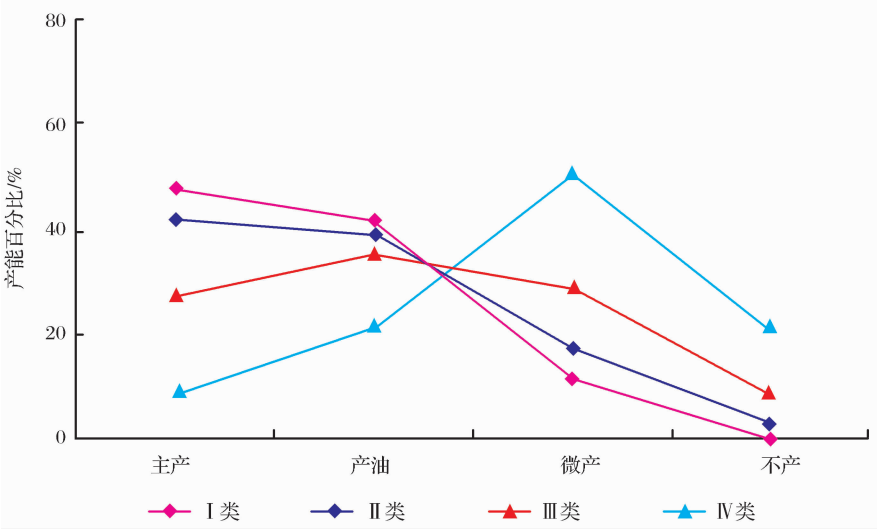


图 2 各类流动单元产能状况

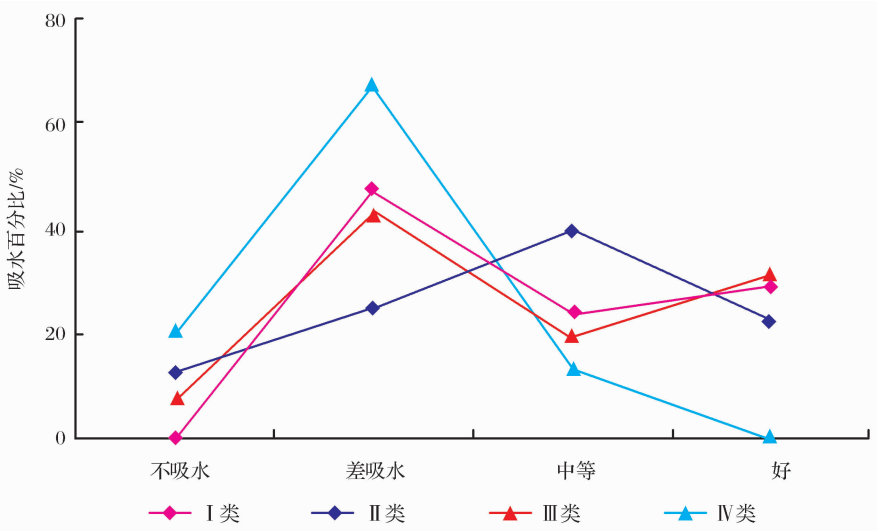


图 3 各类流动单元吸水状况

统时,对Ⅲ类、Ⅳ类流动单元主要采取上增压泵等措施。

3.3 开发效果

通过研究,官 195 区块不同流动单元区域,采取了不同的挖潜措施。如在Ⅰ类流动单元区域官 48-3-2 井附近剩余油较富集,决定进行侧钻挖潜井间剩余油,目前该侧钻井累产油 1.5135×10^4 t,取得了较好的效果。在对官 50-6 井进行调剖后,处于Ⅱ类流动单元区域中的一线受益井官 50-6-1 井,产量由 2.56 t/d 上升到 11.63 t/d。官 50-5 井,处于Ⅲ类流动单元区域,当产量降到 1.57 t/d 后,补开枣 V_下油组,产量上升到 6.66 t/d。

在孔南官 195 区块根据不同流动单元采取不同措施后,该断块日产水平由研究前的 65 t/d 提高到 107 t/d;油井日产能力由 85 t/d 提高到 130 t/d;采

油速度由 0.5% 提高到 0.84%,目前已累计增油 1.93×10^4 t。措施实施后,该区块注采连通程度由 82% 上升到 85.6%,注采对应率由 61.8% 上升到 74%,局部井网的油井受益方向得到加强,双多向受益井由治理前的 1 口上升到 13 口。水驱波及体积系数由治理前的 0.102 上升到 0.132,最终采收率将有望提高 5.1%。

4 结论

(1)恒速压汞技术研究岩心的孔隙结构结果表明,对于沉积环境中孔中渗储层来说,影响流体流动能力的因素主要是喉道大小。

(2)储层的喉道是决定储层物性的关键因素,也是决定Ⅲ类、Ⅳ类流动单元开发难度和开发效果差异的主要因素。

(3)在制定区块开发方案时,应根据不同流动单元的不同微观孔隙结构特征,采取不同的开发策略。

参考文献:

[1] Jin Chengzhi, Yang Shuangling, Shu Ping, *et al.* Comprehensive research on relationship between productivity and porestructure characteristics of volcanic reservoir in Shengping developing area[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(2): 38-41, 45. [金成志, 杨双玲, 舒萍, 等. 升平开发区火山岩储层孔隙结构特征与产能关系综合研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(2): 38-41, 45.]

[2] Wang Huaizhong, Zheng Zhenying, Zhang Guiming, *et al.* Study on the remaining oil distribution and potential tapping measurers of alluvial environment in Guan195 fault block of Kongnan area [J]. *Xinjiang Geology*, 2009, 27(4): 399-402. [王怀忠, 郑振英, 张桂明, 等. 核磁共振在孔南官 195 断块剩余油挖潜中的应用[J]. *新疆地质*, 2009, 27(4): 399-402.]

[3] Yin Taiju, Zhang Changmin, Wang Shouping. Flow unit classification of Pu53 reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(3): 298-301. [尹太举, 张昌民, 王寿平. 濮 53 块流动单元分类

方法研究[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(3): 298-301.]

[4] Zhu Yongxian, Sun Wei, Yu Feng. 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[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(4): 553-556. [朱永贤, 孙卫, 于锋. 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[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(4): 553-556.]

[5] Gu Li, Yu Xinghe, Wan Yujin, *et al.* Sedimentary facies of the forth sub-member of the Shanshan Formation at Shanle oil and gas field in Tuha basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(1): 81-86. [古莉, 于兴河, 万玉金, 等. 冲积扇相储层沉积微相分析——以吐哈盆地鄯勒油气田第三系气藏为例[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(1): 81-86.]

[6] Yu Junbo, Guo Dianjun, Wang Xinqiang. Study of microscopic behaviors of low permeable reservoir through constant velocity mercury injection technique[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2006, 30(2): 22-25. [于俊波, 郭殿军, 王新强. 基于恒速压汞技术的低渗透储层物性特征[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(2): 22-25.]

Application of Constant Velocity Mercury Injection Technique to Study Microscopic Pore Structures on Various Reservoir Flow Unit in Kongnan Area

WANG Yi-chao¹, WANG Huai-zhong², LI Lian-min², YU Xin², ZHUANG Hong-mei²
(1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*;
2. *Exploration & Development Research Institute of Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China*)

Abstract:Constant velocity mercury injection technique can not only measure the numbers of the pore and the throat, but also get the radiuses of the pore and the throat. The porosity characteristics of various flow units in Kongnan area are studied by means of rate controlled mercury penetration method. The results indicate that, the throat radiuses and the effective throat volumes of different flow units are significantly different; the pore radiuses of different flow units are significantly different, but the effective pore volumes of different flow units are not significantly different; the pore/throat radius ratios of different reservoir flow units are significantly different; the Ⅲ kind of flow units has relatively more pores and throats effective. In summary, the main factor affecting the flow capacity of alluvial environment is the throat radius. According to different micro-pore structures of the different flow units, it should take a different development strategy. After the implementation of the measures, it has a good development result in Guan-195 block of Kongnan area.

Key words:Constant velocity mercury injection technique; Microscopic pore structure; Flow unit; Reservoir flow unit; Throat radius.