

苏里格气田致密砂岩气藏有效储层建模方法

刘莉莉^{1,2},徐文^{1,2},石石³,肖峰^{1,2}

(1.中国石油长庆油田分公司苏里格气田研究中心,陕西西安710018; 2.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西西安710018; 3.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊065000)

摘要:苏里格气田为典型的河流相致密砂岩气藏,其有效储层的规模小、叠置形式多样、结构复杂;储层的平面和纵向非均质性强,难以进行精细刻画,气藏精细建模的难度较大。传统的确定性沉积相建模与随机性沉积相建模方法在单独使用时均存在较大的局限性,其地质模型与动态拟合的符合率偏低。以苏里格气田苏6加密试验区为研究对象,通过对沉积微相、有效储层规模及分布规律的研究,提出基于确定性沉积相建模与随机性沉积相建模相结合的分级沉积相建模方法,以动态分析成果约束相控的有效储层建模方法。该方法综合了单一传统建模方法的优点,加强动、静态参数的约束,提高了地质模型的精度,一次历史拟合符合率为52.4%,可以较好地反映储层实际情况。

关键词:致密砂岩气藏 有效储层建模 动态约束 沉积相模型 动态拟合 苏里格气田

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0047-05

A new effective reservoir modeling method for tight sandstone gas reservoir in Sulige gasfield

Liu Lili^{1,2}, Xu Wen^{1,2}, Shi Shi³, Xiao Feng^{1,2}

(1.Sulige Gas Field Research Center, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an City, Shannxi Province, 710018, China; 2.State Engineering Laboratory of Low Permeable Oil and Gas Reservoir Exploration and Development, Xi'an City, Shannxi Province, 710018, China; 3.Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang City, Hebei Province, 065000, China)

Abstract: Sulige gasfield is a typical fluvial tight sandstone gas reservoir. The effective reservoir of the gas reservoir is thin with various superimpose and complex structure. The reservoir has strong heterogeneity both in the horizontal and vertical and it is difficult to be finely described. As a result it is difficult to model the gas reservoir accurately. Either conventional deterministic or stochastic method can not make a satisfied sedimentary facies model because of their limitations when they were used alone, and the geological model obtained agrees poorly with the associated dynamic simulation. As a case from the Su6 infilling well experimental area in Sulige gasfield, an effective reservoir modeling method was built combining deterministic sedimentary facies modeling with stochastic sedimentary facies modeling to control and constraint gradually sedimentary facies modeling based on sedimentary microfacies study, effective reservoir size and distribution. The accuracy of geologic modeling could be improved through synthesizing advantages of the single conventional modeling method and being constrained by dynamic and static parameters. A history matching coincidence rate is 52.4%, which indicates that the new method can model the actual situation of the reservoir better.

Key words: tight sandstone gas reservoir; effective reservoir modeling; dynamic constraint; sedimentary facies modeling; dynamic simulation; Sulige gasfield

对于致密强非均质砂岩气藏的建模方法,中外学者已做了大量的研究^[1-3];但多数仅局限于传统的

收稿日期:2015-03-17。

作者简介:刘莉莉(1982—),女,四川崇庆人,工程师,硕士,从事气藏工程研究工作。联系电话:(029)86978571, E-mail:liulili_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油科技攻关项目“长庆气田稳产及提高采收率技术研究”(2011E-1306)。

确定性沉积相建模或随机性沉积相建模方法阶段,且单独使用传统的确定性沉积相建模和随机性沉积相建模方法时均存在较大的局限性,其地质模型与动态拟合的符合率偏低。尽管有国外学者尝试将储层的动态资料加入静态模型中,但尚未形成规律性的研究方法。为此,笔者将地质规律与生产动态相结合,通过不同建模方法下的模型评估,建立了适用于致密强非均质砂岩气藏的建模方法,以期为苏里格气田的开发调整提供有效的技术支持。

1 地质概况

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的西北侧,为典型的河流相致密砂岩气藏。主力含气层系为下石盒子组盒8段和山西组1段,埋深约为3 200~3 500 m,厚度约为80~100 m。研究区致密砂岩气藏的分布主要受沉积相控制,盒8段下亚段发育辫状河沉积,河道多期叠置,横向连片分布,以心滩微相为主;盒8段上亚段和山1段发育曲流河沉积,河道规模相对较小,多呈孤立状分布,以边滩微相为主。其孔隙度一般为5%~13%,平均为8.5%,覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层占总储层的92%^[4-5]。研究区有效储层的规模小、结构复杂,且非均质性强,导致气井的产量低、压力下降快、控制面积小,因此受沉积相控制的有效储层建模成为致密砂岩气藏建模的关键。为了研究苏里格气田有效储层的规模、叠置模式及空间分布规律,于2003和2007年在气田中部的苏6加密试验区部署2批加密试验井;东西最小井距为366 m,南北最小排距为565 m,平均井间距为562 m,平均排间距为630 m。截至2013年底,研究区共实施干扰试井14个井组,其中20口投产井具有10 a以上的生产历史,动、静态数据丰富,已具备进行精细建模研究的基础。

2 沉积相建模方法对比

有效储层受沉积相的控制,沉积相模型的建立是有效储层建模的关键。传统的沉积相建模方法均无法真实地描述致密砂岩储层的岩相变化,因此,采用确定性沉积相建模与随机性沉积相建模方法相结合的分级沉积相建模方法来建立苏6加密试验区的沉积相模型。以沉积相的平面分布作为确定性沉积相建模的边界条件,采用网格赋值的方法确定性建立沉积相模型。以单井沉积相划分为基

础,统计各沉积微相的规模及分布规律;其中,盒8段下亚段辫状河亚相心滩微相的长度为1 000~2 000 m,宽度为600~1 100 m;盒8段上亚段曲流河亚相边滩微相的长度为600~1 400 m,宽度为400~900 m。根据统计结果设置变差函数,以确定性沉积相模型为控制条件,利用序贯指示方法随机性模拟沉积微相。该方法避免了仅利用确定性沉积相建模方法进行平面沉积相成图过程中部分地质信息的丢失,也减少了使用随机性沉积相建模方法所存在的不确定性。由确定性沉积相建模方法与分级沉积相建模方法的对比结果(图1)可以看出,分级沉积相建模方法可以精细雕刻出薄层的隔夹层,反映沉积储层的非均质性,其储层的物性参数主要受沉积相控制。因此,在建立沉积相模型的基础上,采用序贯高斯模拟方法,可以建立针对每种沉积微相的储层物性模型。

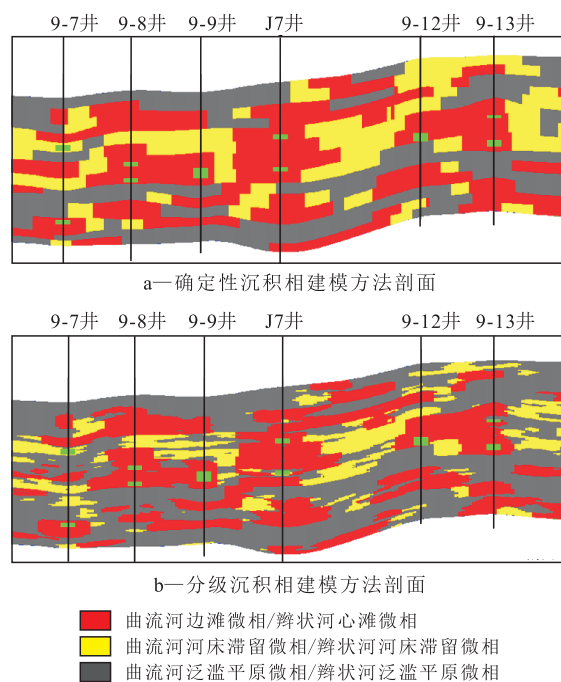


图1 苏6加密试验区确定性沉积相建模方法与分级沉积相建模方法对比

Fig.1 Facies modeling method comparison in Su6 experimental zone

3 有效储层建模方法优选

有效储层模型的建立是地质建模中非常重要的环节,其对模型的地质储量和储层的连通关系等均具有较大影响,是致密砂岩气藏有效储层建模的难点之一。

为实现苏里格气田致密砂岩气藏的精细地质建模,在沉积相建模的基础上,对3种不同有效储层

建模方法的效果进行对比,优选出适合研究区致密砂岩气藏的有效储层建模方法,并将拟合效果较好的模型作为最终的有效储层模型。

3.1 储层物性下限有效储层建模方法

根据苏里格气田致密砂岩气藏有效储层的孔隙度下限值(5%)、渗透率下限值($0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和含水饱和度下限值(50%)^[6-7],建立有效储层模型1;计算得出该模型的地质储量为 $36.92 \times 10^8 \text{ m}^3$,储量丰度为 $1.482 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。在不修改任何模型参数的情况下,从研究区9-7井有效储层模型1历史拟合曲线(图2)可以看出,其模拟井底流压比实际生产井底流压偏高,且在参与建模的42口井中有28口气井的模拟井底流压亦比实际生产井底流压偏高,模型一次历史拟合符合率仅为14.2%,整体拟合效果较差。

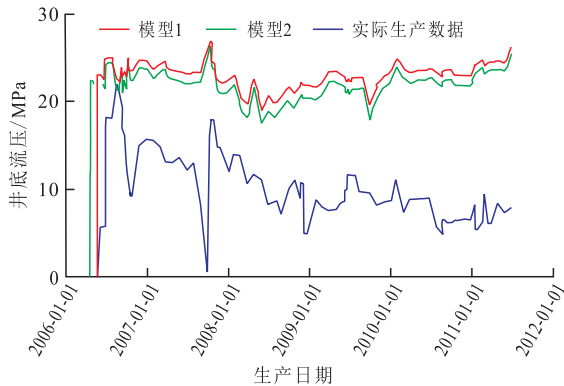


图2 苏6加密试验区9-7井有效储层模型1与模型2历史拟合曲线对比

Fig.2 Correlation of history pressure curves of effective reservoir model 1 and model 2 for Well 9-7 in Su6 experimental zone

3.2 测井解释成果约束有效储层建模方法

测井解释成果约束有效储层建模方法主要利用测井解释成果设置变差函数,变程为 500×300 ,计算得出模型2的储量丰度为 $1.131 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。对比研究区9-7井有效储层模型1与模型2的历史拟合曲线(图2)可以看出,模型2的井底流压整体下降但趋势不变,模型一次历史拟合符合率略有提高,为21.4%,且在参与建模的42口井中有26口气井的模拟井底流压比实际生产井底流压偏高。综合分析认为,测井解释成果约束有效储层建模方法建立的模型2好于储层物性下限有效储层建模方法建立的模型1。

为提高模型2的一次历史拟合符合率,对其参数进行适当调整,共设计3套调整方案进行对比。方案1(模型3)为在模型2的基础上参考气井的平均泄流半径,设置 $880 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的阻流带^[8],边界传

导系数设置为0.01,即渗透率缩小100倍,以降低储层平面的连通性;方案2(模型4)为参考苏里格气田应力敏感试验结果^[9-10],在模型2的基础上对常规渗透率进行覆压校正;方案3(模型5)是在模型2的基础上,同样设置 $880 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的阻流带,边界传导系数设置为0.1,并对建立的模型5的渗透率模型进行覆压校正。

对比研究区S6井有效储层模型2,3,4和5的生产动态历史拟合结果,从其历史拟合曲线(图3)可以看出,模型3,4和5与模型2相比,其模拟井底流压整体虽然下降,但趋势基本一致。气井累积产气量的预测结果显示,4个模型的单井累积产气量远大于生产动态分析结果的单井累积产气量($2221 \times 10^4 \text{ m}^3$)。综合分析认为,测井解释成果约束有效储层建模方法尽管采用了多种模型连通性调整方案,但根据其建立的有效储层模型计算的地质储量仍偏大,4个模型平面及垂向连通性偏好,导致模拟井底流压偏高,不能满足精细建模及数值模拟要求。

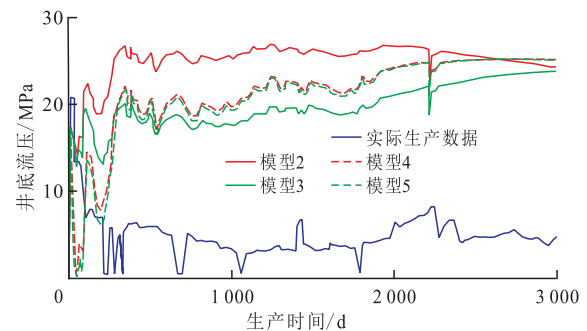


图3 苏6加密试验区S6井测井解释成果约束有效储层建模方法建立的4个模型的历史拟合曲线对比

Fig.3 History pressure curve of Well S6 and the compared curves of effective reservoir models under logging results control in Su6 experimental zone

3.3 动态分析成果约束相控有效储层建模方法

动态分析成果约束相控有效储层建模方法主要是在沉积相精细建模的基础上,采用相控建模的思路,应用动态分析成果设置变差函数,约束有效储层展布范围,采用序贯指示方法对其进行随机模拟。该方法与上述2种有效储层建模方法的区别为,更注重以动态分析成果的约束,模型的有效储层分布与已钻井的测井解释结果相符合,且井间插值符合单井统计概率。

3.3.1 动态约束条件的确定

动态约束条件的确定主要是采用FAST RTA软件对研究区的气井进行生产动态分析,设置压裂气井线性渗流特征的Wattenbarger模型,分析致密压裂气井的泄流长度、宽度及面积^[11]。研究结果表

明,苏6加密试验区气井的平均泄流长度为883 m,平均泄流宽度为295 m(图4)。但由于目前研究区气井多为合层开采,动态计算的单井泄流半径仍不能简单地用以代表单砂体的展布规模来约束模型;因此,须采用不同分布概率下的动态约束条件来进行有效储层模型的不确定性分析。

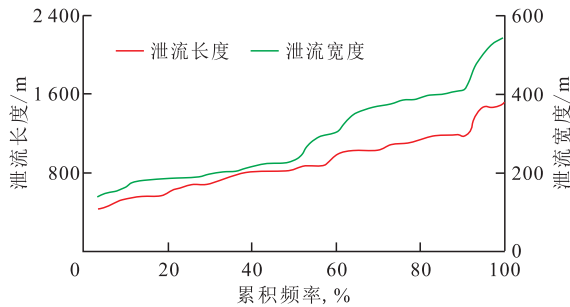


图4 苏6加密试验区动态分析气井泄流长度和宽度的累积频率曲线

Fig.4 Cumulative frequency graph of single well drainage area in Su6 experimental zone

3.3.2 有效储层模型的不确定性分析

根据动态分析结果,取泄流半径累积概率为10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%和90%共9组数据设置变差函数,采用序贯指示的方法,在沉积相模型的控制下,分析不同沉积微相有效储层的分布概率,设定随机模拟种子数,开展相控有效储层建模,共建立9个有效储层模型(表1)。从模型6至模型14的对比结果可以看出:随着泄流长度和宽度的增大,储层的连通性逐渐变好;但由于设定了固定的随机种子数,因此建立的有效储层模型的

表1 动态分析成果约束相控有效储层模型的基本参数
Table1 Performance analysis results for dynamic modeling

模型编号	泄流半径累积概率, %	泄流长度/m	泄流宽度/m	地质储量/ 10^8 m^3	储量丰度/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	一次历史拟合符合率, %
6	10	530	164	29.19	1.127	26.2
7	20	614	190	29.16	1.126	50.0
8	30	673	208	30.48	1.177	45.2
9	40	789	226	30.08	1.162	47.6
10	50	850	240	29.99	1.158	52.4
11	60	1 045	323	29.91	1.155	50.0
12	70	1 193	369	28.96	1.119	50.0
13	80	1 252	387	29.67	1.146	45.2
14	90	1 332	412	29.41	1.136	47.6

储层分布基本一致。9个有效储层模型的历史拟合结果表明,其一次历史拟合符合率为26.2%~52.4%,以模型10的符合率最高;该模型根据累积频率为50%的动态分析成果设置变差函数,变程为850×240,在参与建模的42口井中有22口井与实际历史生产动态具有很好的相关性,5口井的模拟井底流压低于实际生产井底流压,15口井的模拟井底流压高于实际生产井底流压,一次历史拟合符合率为52.4%。

3.4 对比与评价

通过储层物性下限、测井解释成果约束和动态分析成果约束相控3种有效储层建模方法的对比(表2)表明,动态分析成果约束相控有效储层建模方法建立的模型一次历史拟合符合率最高,更符合地质规律,可以较好地反映储层内部的非均质性。

表2 有效储层建模方法对比与评价
Table2 Comparison and evaluation of effective reservoir modeling method

有效储层建模方法	模型编号	储量丰度/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	一次历史拟合符合率, %	优缺点	综合评价
储层物性下限	1	1.482	14.2	模型计算的地质储量比实际地质储量偏大	较差
测井解释成果约束	仅采用测井解释成果约束		21.4		一般
	在模型2基础上设置阻流带		23.8		一般
	在模型2基础上设置覆压校正	1.131	26.2	储层物性、连通性偏好	较好
	在模型2基础上设置阻流带与覆压校正		26.2		较好
动态分析成果约束相控	10	1.158	52.4	符合生产动态及地质规律	好

4 结束语

致密砂岩气藏的储层具有较强的非均质性,对有效储层精细刻画难度较大,复杂的地质条件决定了常规有效储层建模方法的局限性,仅采用确定性沉积相建模或随机性沉积相建模均无法准确刻

画有效储层的非均质性。将确定性沉积相建模与随机性沉积相建模相结合,以分级相控的沉积相建模为思路,可以有效刻画沉积相,特别是沉积微相的分布。储层物性下限、测井解释成果约束和动态分析成果约束相控3种有效储层建模方法的对比及综合评价结果表明,动态分析成果约束相控有效储层建模方法建立的有效储层模型更符合生产动态

及地质规律,可以较好地适用于致密强非均质砂岩气藏的有效储层建模,研究成果为后期苏里格气田的稳产及提高采收率技术研究奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 吴胜和,金振奎,黄沧钿,等.储层建模[M].北京:石油工业出版社,1991.
Wu Shenghe, Jin Zhenkui, Huang Cangtian, et al. Reservoir modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [2] 郑应钊,刘国利,马彩琴,等.多条件约束地质建模技术在青西油田裂缝性油藏中的应用[J].油气地质与采收率,2011,18(3):77-80,93.
Zheng Yingzhao, Liu Guoli, Ma Caiqin, et al. The application of multiple constraints geo-modeling technology in Qingxi fractured reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3):77-80,93.
- [3] 贾爱林,唐俊伟,何东博,等.苏里格气田强非均质致密砂岩储层的地质建模[J].中国石油勘探,2007,25(1):12-16.
Jia Ailin, Tang Junwei, He Dongbo, et al. Geological modeling for sandstone reservoirs with low permeability and strong heterogeneity in Sulige gasfield[J]. China Petroleum Exploration, 2007, 25(1):12-16.
- [4] 成志刚,宋子齐,何羽飞,等.岩石物理相分类与致密储层含气层评价——以苏里格气田东区致密储层老井复查为例[J].油气地质与采收率,2013,20(5):23-27,32.
Cheng Zhigang, Song Ziqi, He Yufei, et al. Classification of petrophysical facies and gas evaluation in tight reservoir—case of re-evaluation of old wells in eastern Sulige[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5):23-27,32.
- [5] 谢润成,周文,晏宁平,等.致密低渗砂岩储层质量控制因素研究——以靖边气田盒8段为例[J].石油实验地质,2010,32(2):120-123.
Xie Runcheng, Zhou Wen, Yan Ningping, et al. Study on control factors of quality of compact sandstone reservoir—taking He8 formation of the Jingbian gasfield as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2):120-123.
- [6] 任茵.苏里格气田苏53区块天然气储量计算及其参数确定方法[J].天然气勘探与开发,2012,35(3):17-23.
Ren Yin. Gas reserve calculation of Su53 block in Sulige gasfield and method to determine reserve parameters[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(3):17-23.
- [7] 黎菁,杨勇,王少飞,等.苏里格气田东区致密砂岩储层物性下限值的确定[J].特种油气藏,2011,18(6):52-56.
Li Jing, Yang Yong, Wang Shaofei, et al. Determination of lower limits of the physical properties of consolidated sandstone reservoirs in eastern Sulige gas field[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(6):52-56.
- [8] 罗晓义,马素俊.试井及生产动态资料在阻流带评价中的应用——以义庄9井区为例[J].油气地质与采收率,2010,17(1):96-98.
Luo Xiaoyi, Ma Sujun. Application of well test and dynamic data to evaluation on choked flow zone—a case study of Zhuang9 well-block[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1):96-98.
- [9] 罗瑞兰,程林松,李熙喆,等.低渗透储层岩石覆压实验变形特征分析[J].天然气工业,2009,29(9):46-49.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Li Xizhe, et al. The deformation characteristics of low permeability reservoir rocks under confining pressure[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9):46-49.
- [10] 章星,杨胜来,章玲,等.低渗透气藏克氏渗透率影响因素室内实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):84-86.
Zhang Xing, Yang Shenglai, Zhang Ling, et al. Experimental study on factors of KlinKenberg permeability in low permeable gas reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2):84-86.
- [11] 任允鹏,吴晓东,王少军.确定油气井泄流半径的新方法[J].油气地质与采收率,2010,17(5):73-75.
Ren Yunpeng, Wu Xiaodong, Wang Shaojun. A new method for determining drainage radius of oil and gas well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5):73-75.

编辑 邹澍滢

(上接第46页)

- Zhang Kexin, Qi Jiafu, Lin Huixi. Mesozoic thrusting of the Chengdao-Kendong structural belt and its relation to the Tan-Lu fault zone in Jiyang area[J]. Chinese Journal of Geology: Scientia Geologica Sinica, 2006, 41(2):270-277.
- [14] 蔡蕊,刘浩.南堡凹陷高柳断裂带构造变形特征与物理模拟研究[J].特种油气藏,2013,20(4):41-44.
Cai Rui, Liu Hao. High willow degeneration fault structure in the nanpu sag and physical simulation study[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4):41-44.
- [15] 雷克辉,钟宁宁.塔中I号坡折带断裂系统空间展布及演化规律[J].特种油气藏,2013,20(2):12-15.
Lei Kehui, Zhong Ningning. The spatial distribution characteristics and evolution law of the fault systems in Tazhong No.1 slope break, Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(2):12-15.
- [16] 孙和风,曾选萍,贺电波,等.莱州湾凹陷温压系统与油气成藏[J].油气地质与采收率,2010,17(1):19-21.
Sun Hefeng, Zeng Xuanping, He Dianbo, et al. Characteristics of geotemperature-geopressure systems and its relation of petroleum accumulation in Laizhou Bay Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1):19-21.

编辑 经雅丽