

曲流河点坝型厚油层内部构型及其对剩余油分布的影响

王鸣川¹,朱维耀¹,董卫宏²,石成方³

(1.北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083; 2.天津市地质调查研究院,天津 300191; 3.中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:目前中国大部分厚油层类油田已进入高含水开发阶段,水淹严重,剩余油高度分散。为明确曲流河点坝型厚油层的剩余油分布规律及其影响因素,在曲流河点坝内部构型分析的基础上,利用面控制建模方法建立点坝精细构型地质模型;并运用数值模拟方法,采用正交试验与单因素实验相结合,对曲流河点坝型厚油层剩余油分布进行研究。结果表明,曲流河点坝型厚油层剩余油整体分散,局部富集;剩余油主要分布于点坝顶部、侧积层遮挡部位以及井间水驱未波及区域;侧积层倾角、注水方式、侧积面曲率、侧积间距、井网以及侧积层连通性等因素均会对剩余油分布产生重要影响。正交试验结果表明,侧积层倾角越小,连通性越差,侧积间距越大,曲流河点坝型厚油层的开发效果越好。根据曲流河点坝型厚油层剩余油分布特征,可采取在其上部钻水平井、中部转换注水方式和下部调堵油水井的方式进行挖潜。

关键词:厚油层 点坝 剩余油 影响因素 数值模拟

中图分类号:TE112.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2013)03-0014-04

目前中国老油田主力厚油层水淹严重,剩余油分布复杂,剩余油分布与挖潜已成为老油田稳产迫切需要研究的课题。大庆油区曲流河点坝型厚油层的储量在已发现油气储量中占很大比重^[1],因此,研究其剩余油分布及影响因素,对大庆油区的稳产具有重要的理论与现实意义。曲流河点坝内部的侧积层作为非渗透遮挡夹层,直接影响砂体内部的连通状况及注采受效情况,其控制的剩余油储量逐渐成为挖潜的重要目标^[2-5]。由于曲流河道不断侧移,曲流河点坝内岸砂体沉积不断侧向加积增长形成多个侧积体,中间由侧积层相互分隔,这种侧积层对油水渗流具有重要的影响和控制作用^[1]。随着老油田开发程度的加深,曲流河点坝内部砂体的差异对剩余油分布的影响越来越明显,须对点坝侧积层的各种特征进行详细地分析、研究,以期为老油田剩余油分布研究及下步挖潜措施提供理论支持。

1 内部构型模式

自 Miall^[6-8]提出构型要素分析法之后,中外很

多学者以露头 and 现代沉积为指导,进一步发展了曲流河点坝内部侧积层的沉积理论及识别方法,并建立了曲流河点坝的水平斜列式、阶梯斜列式和波浪式3种构型模式。

1.1 水平斜列式

水平斜列式点坝一般是潮湿型小河流或是潮湿环境下水位变化不大的河流沉积形成的,其点坝表面相对平坦^[9],内部侧积层分为不连通模式和半连通模式2种类型^[10-11]。不连通模式侧积层纵向上完全填充点坝空间,半连通模式侧积层纵向上充填点坝约2/3厚度或更小。

1.2 阶梯斜列式

阶梯斜列式点坝是由大型河流或干旱—半干旱地区水位随季节性变化的河流沉积形成的,可反映出河滩地形的台阶起伏^[9]。薛培华^[1]认为曲流河点坝砂体由侧积体、侧积层和侧积面3个要素组成,提出了“点坝侧积体沉积迭式”的概念,认为点坝砂体是一种半连通体式的储集体。每次洪泛事件,河流侧向加积形成1个侧积体,1个点坝是由若干个侧积体叠加组合而成的。

收稿日期:2013-03-15。

作者简介:王鸣川,男,在读博士研究生,从事渗流力学和油气田开发研究。联系电话:13401052809, E-mail:wang_mingchuan@126.com。
基金项目:国家科技重大专项“剩余油分布综合预测与精细注采结构调整技术”(2011ZX05010-002)。

1.3 波浪式

波浪式点坝侧积体之间的侧积层呈波状起伏,不同沉积时期的侧积层相互交汇,侧积层的倾角变化不定^[12],反映出点坝砂体沉积的滩地表面起伏不平,形成波浪式侧积体组合的河流介于水平斜列式和阶梯斜列式侧积体组合的河流之间^[9]。

1.4 构型要素的定量描述

一般曲流河点坝增生单元侧积体的规模较小,即使在100 m小井距条件下也难以准确控制^[13]。因此,为确保研究结果能够广泛适用,曲流河点坝的构型要素采用目前中外已公认的经验公式来进行定量描述。

点坝侧积体最大宽度在河曲的弯顶处,其宽度大约为河流满岸宽度的 $2/3$ ^[1]。点坝侧积层倾角根据何宇航等^[14]总结出的大庆油区点坝侧积层倾角的经验公式来确定。研究表明,大庆油区曲流河点坝型厚油层的侧积层倾角一般约为 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ^[15],其中河曲弯顶处的倾角最大,河曲两端的倾角较小。侧积层厚度变化较大,从0.2~3 m均有发育,呈倾斜的不规则薄层状。侧积体在平面上呈新月形,宽度一般为60~70 m,个别达150 m。在1个点坝砂体中,每个侧积体的规模往往不同,并受控于每次水动力作用的差异。

2 剩余油影响因素

2.1 点坝精细构型地质模型建立

根据大庆油区某油田的实际资料,采用面控制建模方法,利用Petrel地质建模软件,建立研究区三维水平斜列式点坝精细构型地质模型;并根据侧积层的形态和参数,将侧积层直接加入地质模型中进行模拟。地质模型的平面网格尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,纵向网格尺寸为0.5 m,建立 $60 \times 60 \times 12$ 的网格系统(图1);其侧积层延伸长度与渗透性通过设置侧积层的物性来控制,孔隙度和渗透率采用垂直函数控制,整体呈正韵律分布,高压物性资料采用大庆油区某油田的实测资料,纵向渗透率为平面渗透率的 $1/10$,相渗曲线、孔隙度取值与渗透率相匹配;地面油、气

和水的密度分别为 $0.749, 0.001$ 和 1.0 g/cm^3 ;油、水和岩石的压缩系数分别为 $5.2 \times 10^{-4}, 1.1 \times 10^{-3}$ 和 $4 \times 10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$;油和水的体积系数分别为1.57和1.14;地面油和水的粘度分别为5.5和 $0.5\text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

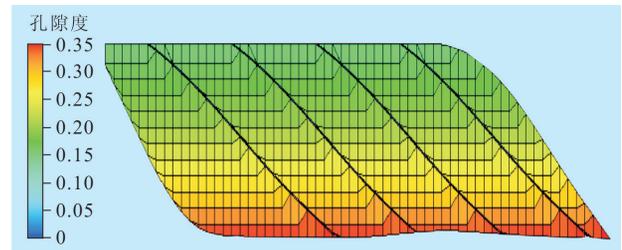


图1 三维水平斜列式点坝精细构型地质模型(剖面)

2.2 影响因素

2.2.1 侧积层倾角、侧积间距、侧积面曲率以及注水方式

根据曲流河点坝型厚油层中油水流动的影响因素,结合点坝内部的构型特征,利用正交试验法^[16-17],选用3水平4因素正交试验,建立9个侧积层精细构型地质模型进行数值模拟计算;当含水率为98%时停止,并以采收率作为判别标准来分析各影响因素不同水平对剩余油分布的影响(表1)。

表1 正交试验设计方案及对应的采收率

方案	侧积层倾角/ $^{\circ}$	侧积间距/m	侧积面曲率	注水方式	采收率
1	5	35	0	无夹层	0.505 3
2	5	50	0.001 1	顺夹层	0.474 9
3	5	70	0.002 7	逆夹层	0.478 4
4	10	35	0.001 1	逆夹层	0.451 6
5	10	50	0.002 7	无夹层	0.463 9
6	10	70	0	顺夹层	0.458 3
7	15	35	0.002 7	顺夹层	0.311 4
8	15	50	0	逆夹层	0.446 9
9	15	70	0.001 1	无夹层	0.487 9

注:顺夹层指注水方式顺着侧积层倾向,逆夹层指注水方式逆着侧积层倾向。

研究结果(表2)表明,侧积层倾角、注水方式、侧积间距和侧积面曲率均对曲流河点坝型厚油层的开发效果及剩余油分布具有显著影响。侧积层倾角是单砂体内侧积层的主要特征因素,其对油水

表2 正交试验分析结果

影响因素	k_1	k_2	k_3	R	主次顺序	较优水平
侧积层倾角	0.486 2	0.457 9	0.415 4	0.070 8	1	5
侧积间距	0.422 8	0.461 9	0.474 9	0.052 1	3	70
侧积面曲率	0.470 2	0.471 5	0.417 9	0.053 6	2	0.001 1
注水方式	0.485 7	0.414 9	0.459 0	0.070 8	1	无夹层

注: k_1, k_2, k_3 为影响因素各水平采收率的算术平均值; R 为因子极差。

流动的影响显著;采收率随着侧积层倾角的增大而降低。剩余油分布受侧积层遮挡作用影响,顺着侧积层走向较容易形成完善的注采关系,而垂直于侧积层走向则不易形成完善的注采关系。在顺着侧积层走向的注水条件下,逆侧积层倾向注水开发的采收率比顺侧积层倾向注水开发的采收率高。侧积间距指相邻侧积层相交点之间距离在平面上的投影距离,侧积间距越大,注入水纵向驱替面积越大,驱替效果越好。侧积面曲率对采收率也有影响,侧积面曲率越大,采收率越低;但当侧积面曲率小于0.001 1(等效曲率半径为900 m)时,侧积面曲率的影响效果不明显。

2.2.2 井网模式

井网模式对流动性差异产生的剩余油具有控制作用^[18]。为了研究曲流河点坝型厚油层不同井网模式下的开发效果及剩余油分布,在相同的曲流河点坝地质模型中,分别模拟了行列式井网、反五点井网(变形的行列式井网)和反九点井网条件下的开采情况。模拟结果表明(图2),行列式井网和反五点井网的开发效果明显好于反九点井网;而进入高含水期后,行列式井网的开发效果要好于反五点井网。因此,高含水期曲流河点坝型厚油层应采用行列式井网来提高开发效果。

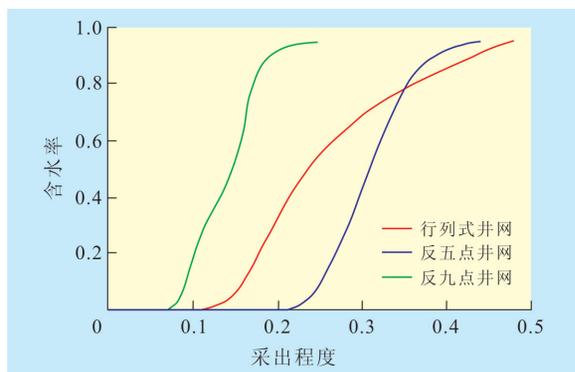


图2 不同井网模式下采出程度与含水率的关系

2.2.3 侧积层连通性

目前针对侧积层连通性对曲流河点坝型厚油层开发效果影响的定量研究较少,且多为定性分析。为此,笔者在同一个曲流河点坝地质模型的基础上,设计了侧积层不连通、半连通(下部1/3连通)和侧积层孔隙度、渗透率极小(为侧积体孔隙度和渗透率的1/100)3种情况,以分析侧积层连通性对曲流河点坝型厚油层开发效果及剩余油分布的影响。模拟结果(图3)表明,在行列式井网顺侧积层倾向注水情况下,当侧积层不连通,或者侧积层物性较差时,由于侧积层的遮挡作用,使注入水的波

及体积增大,开发效果变好;侧积层半连通时,当注入水突破后,含水率迅速上升,导致开发效果变差,剩余油在侧积层下部和点坝上部富集。

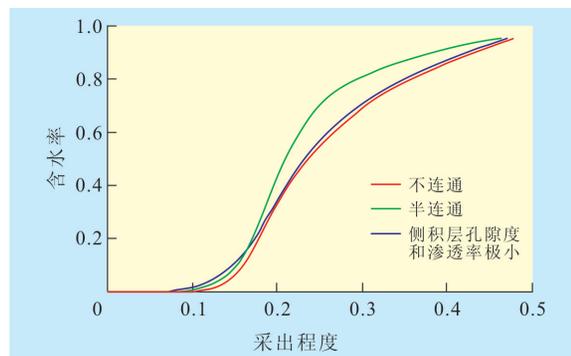


图3 不同侧积层连通性的采出程度与含水率的关系

3 剩余油分布与挖潜

由于曲流河点坝型厚油层独特的构型模式以及不同井网开发的影响,其剩余油分布复杂,呈现出整体分散、局部富集的特点^[19]。由于侧积层的遮挡作用、曲流河点坝垂向上典型的正韵律特征以及注入水的重力作用,在曲流河点坝顶部约1/3厚度处形成相对厚度大且分布面积广的低、未水淹剩余油;点坝中部和中上部形成沿侧积层分布的坡脊状剩余油,尤其当侧积层倾角小和侧积面曲率大时,坡脊状剩余油分布更加明显;点坝下部受井网和侧积层连通性的影响,形成优势渗流区和分散的井间剩余油。

对于厚油层顶部1/3处相对富集的剩余油,可采用水平井挖潜;对伴随侧积层形成的坡脊状剩余油,由于其分布在侧积层下面,可改变现有注水方式,采用逆侧积层倾向方向注水进行挖潜;对点坝下部优势渗流区中的井间剩余油,可考虑封堵点坝底部油井和改变液流方向来提高井间剩余油动用程度。

4 结论

曲流河点坝型厚油层中侧积层对注入剂具有强烈的遮挡作用,对剩余油分布具有重要的影响。由于侧积层的遮挡和开发井网的影响,在曲流河点坝型厚油层顶部约1/3厚度处形成相对厚度大且分布面积广的低、未水淹剩余油;中部和中上部形成沿侧积层分布的坡脊状剩余油;下部形成优势渗流区和分散的井间剩余油。曲流河点坝型厚油层剩

余油分布的影响因素分析表明,顺侧积层倾向注水、侧积层倾角越大、侧积间距越小及侧积面曲率越大,其遮挡区域的纵向驱替面积越小,开发效果越差,剩余油越富集;顺侧积层倾向注水时,侧积层连通性越差,开发效果越好;相对其他类型井网,反五点井网开发效果较好,高含水期后行列式井网开发效果较好。为提高曲流河点坝型厚油层高含水期的开发效果,根据剩余油分布规律和富集程度,可在油层上部应用水平井、中部转换注水方式以及底部封堵油水井来改善油层动用状况,提高水驱波及系数及油藏水驱采收率。

参考文献:

- [1] 薛培华.河流点坝相储层模式概论[M].北京:石油工业出版社,1991:3-63.
- [2] Ma Shizhong, Zhang Jing, Jin Ningde, et al. The 3D architecture of point bar and the forming and distribution of remaining oil [C]. SPE 57308, 1998.
- [3] 马世忠, 吕桂友, 闫百泉, 等. 河道单砂体“建筑结构控三维非均质模式”研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 57-64.
- [4] 单敬福, 纪友亮, 史榕, 等. 曲流点坝薄夹层构形对驱油效率及剩余油形成与分布的影响[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(4): 21-25.
- [5] 束青林. 河道砂侧积体对剩余油分布的影响——以孤岛油田馆上段3~4砂组高弯度曲流河为例[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 45-48.
- [6] Miall A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth Science Reviews, 1985, 22(2): 261-308.
- [7] Miall A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sand from outcrop studies [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(6): 682-697.
- [8] Miall A D. The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology [M]. New York: Springer-Verlag, 1996: 74-98.
- [9] 李阳, 郭长春. 地下侧积砂坝建筑结构研究及储层评价——以孤东油田七区西Ng5²⁺³砂体为例[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 942-948.
- [10] Jens Hornung, Thomas Aigner. Reservoir and aquifer characterization of fluvial architectural elements: Stubensandstein, upper Triassic, southwest Germany [J]. Sedimentary Geology, 1999, 129(3/4): 215-280.
- [11] Cayo Puigdefabregas, Arthur Van Vliet. Meandering stream deposits from the Tertiary of the Southern Pyrenees [C]//Miall A D. Fluvial Sedimentology. Calgary: Mc Ara Printing Limited, 1978: 469-485.
- [12] 赵翰卿. 河道砂岩中夹层的稳定性[J]. 大庆石油地质与开发, 1985, 4(3): 1-9.
- [13] 陈雨茂, 邓文秀, 滕彬彬. 曲流河点坝内部构型精细解剖——以垦西油田垦71断块馆陶组为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 25-27.
- [14] 何宇航, 宋保全, 白振强. 大庆油田河流相储层精细描述技术发展及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(1): 63-69.
- [15] 袁奕群, 高雅文, 桓冠仁. 点坝砂地层注气数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 1985, (3): 34-40.
- [16] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 64-76.
- [17] 王怀彬, 胡长俊. 油田实用正交试验设计法[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1991: 2-150.
- [18] 邹存友, 韩大匡, 盛海波, 等. 建立采收率与井网密度关系的方法探讨[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 43-47.
- [19] 李春英, 吴晓东, 李淑霞. 特高含水深度开发阶段调整挖潜技术政策界限——以胜坨油田坨28断块沙二段7-8单元为例[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 97-100.
- [20] 与应用[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(3): 58-61.
- [19] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 215-221.
- [20] 张仲培, 王清晨, 王毅, 等. 库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(3): 309-316.
- [21] 郭卫星, 漆家福. 同沉积褶皱生长地层中沉积与构造关系[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 520-524.
- [22] 刘胜, 汪新, 伍秀芳, 等. 塔西南山前晚新生代构造生长地层与变形时代[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 24-28.
- [23] 郭召杰, 方世虎, 张锐, 等. 生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 475-481.
- [24] 黄泽光. 塔里木盆地塔西南与库车坳陷变形特征的对比分析[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 501-505.
- [25] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新世构造应力场及其油气运聚效应[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2004, 34(增刊1): 98-106.
- [26] 顾忆, 邵志兵, 赵明, 等. 塔里木盆地巴楚隆起油气保存条件与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 50-55.
- [27] 宋方敏, 闵伟, 韩竹军, 等. 柯坪塔格推覆体的新生代变形与扩展[J]. 地震地质, 2006, 28(2): 224-233.
- [28] 周新源, 罗金海, 王清华. 塔里木盆地南缘冲断带构造特征及其油气地质特征[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2004, 34(增刊1): 56-62.

编辑 邹澍滢

编辑 经雅丽

(上接第9页)