

曲流河道单砂体驱油效率主控因素

单敬福¹, 纪友亮¹, 史 榕¹, 张 雁²

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 大庆石油学院 地球科学学院, 黑龙江 大庆 613318)

摘要: 为了进一步提高注入剂驱油效率以及准确预测储层中剩余油在三维空间的分布, 以大庆油田葡萄花油层组PI 2小层曲流河道砂体为例, 通过对曲流河道砂体内部薄夹层构形及渗透率垂向分布的差异性分析, 在排除开发因素差异的同井单砂体分析条件下, 提出了单砂体内部薄夹层空间构形、渗透率垂向序列与重力因素共同控制剩余油分布、驱油效率多段垂向序列模式。

关键词: 剩余油; 薄夹层构形; 驱油效率; 渗透率垂向差异性; 重力分异; 曲流点坝

中图分类号: TE122.3; P618.130.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)02-0170-04

Main Controlling Factors for Oil Displacement Efficiency by Single Sand Body in Meandering River Channel

SHAN Jing-fu¹, JI You-liang¹, SHI Rong¹, ZHANG Yan²

(1. School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Earth Sciences, Petroleum Institute of Daqing, Daqing 613318, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to improve oil displacement efficiency of infusing agents and precisely to predict the three dimensional distribution about residual oil, taking the sand body of PI 2 individual meandering river-channel in Putaohua reservoir of Daqing Oilfield as an example, by analyzing the thin interbeds and vertical permeability discrepancy, this paper brings forward the space configuration of the thin interbeds in single sand body, the vertical permeability distribution and gravitational differentiation which control the distribution of residual oil and the vertical multisection model of displacement efficiency in the condition of excluding exploitation factors and identical single sand-body, .

Key words: residual oil; configuration of thin interbeds; oil displacement efficiency; vertical permeability discrepancy; gravitational differentiation; point bar of meandering

0 引言

油田高含水期、三采阶段, 单砂体极其渗透率宏观分布及层内薄夹层对注入剂驱油的影响及其重要性逐渐显现出来。以往只着重从渗透率在储层内分布不均衡的角度来研究储层中驱油效率问题, 忽略了薄夹层对储层驱油效率的影响, 认为曲流河点坝内垂向水淹(或剩余油)规律为: 下部强水淹、中部中水淹和上部弱水淹, 并且一致认为其受控于纵向渗透率的韵律性分布。20世纪80年代以

来, 随着对曲流点坝现代沉积及野外露头研究的深入, 特别是储层构形要素及界面分级理论的建立^[1], 单砂体内部结构、层次及三维非均质模式有了进一步认识和提高。但是, 目前研究却主要集中于古代露头及现代沉积方面, 而对储层驱油效率及剩余油形成、分布的主控因素研究相对较少。笔者通过对曲流点坝侧积体间泥质薄夹层的构形(构形是指薄夹层在三维空间展布的构造形态, 并在曲流点坝侧积体间呈有规律的斜列式分布)的分析, 建立了薄夹层对储层驱油效率及剩余油分布的控制

收稿日期: 2006-06-23

基金项目: 大庆油田公司项目(12010022002100330)

作者简介: 单敬福(1977-), 男, 黑龙江肇东人, 博士研究生, 从事石油储层地质学研究。E-mail: shanjingfu2003@163.com

模型(图 1)。对渗透率垂向差异性的研究, 提出了正韵律、近箱形均质韵律、反韵律和复合韵律分布模式(图 2)。结合油气水重力分异原理, 指出以往经常被忽略且岩心图难以表征的极薄(几至十几厘米)侧积泥岩构形和侧积体渗透率垂向韵律性分布模式以及重力场的存在对点坝砂体内部剩余油的形成、分布起重要控制作用, 这种模式的建立为寻找剩余油及对剩余油的开采无疑提供了重要的理论依据。

1 驱油效率的主控因素

1.1 曲流河点坝薄夹层构形对注入剂驱油的影响

文中薄夹层是指四级界面^[1], 即点坝单一侧积体的顶底界面, 由多个几至十几厘米厚的非渗透侧积泥岩呈新月叠瓦状, 角度以 5°~15°向河道侧移方向斜列分布, 垂向上可达下点坝(约 2/3 河深); 沿侧积方向宽度约 1/2 河宽。经油田实践表明: 主力油层单砂体渗透率为 $(100 \sim 2\,400) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而薄夹层一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 从而使单砂体内部薄夹层具有明显的非渗透或特低渗透作用^[2-6]。通过研究总结出 5 方面的作用:

- (1)局部隔层作用: 将一个厚层局部分隔成几个相对薄层。
- (2)遮挡作用: 使运动中的流体遇到遮挡, 被迫

- 改变方向, 主要针对产状与流向斜交的夹层。
- (3)死角回流作用: 当两夹层合并, 致使砂层尖灭形成死角, 流体受到阻碍回流。
- (4)分流、合流作用: 在夹层消失部位, 使流体形成分流或合流。
- (5)重力分异底板作用: 聚集因重力分异而下沉的水, 并使之沿夹层顶面流动。
- (6)减速缓流作用: 对特低、低渗透夹层, 将使流体流速、流量逐渐减少。

由于倾斜的泥质点坝薄夹层的存在, 造成注入剂沿不同方向运动时受力不同, 形成重力动力与阻力。如果注入水沿侧积泥向下倾方向运动时, 因重力沿运动方向的分力是动力, 所以顺这个方向渗流快; 相反沿上倾方向运动时, 重力的分力是阻力, 从而阻止了流体的运动, 固渗流慢; 而沿侧积泥岩走向呈水平运动时, 重力无分异作用。这里应说明, 当注入的是气体时, 结果却与注入水恰恰相反, 采油井的渗流特征与注水井相反。

在点坝砂体下部, 侧积泥岩被冲蚀而不存在或较少存在, 使下部构成连通体, 渗流特征与上部明显存在差异。当注入剂沿侧积泥岩倾向方向运动时, 来自同一注水井而不同侧积体的水在下部合流(见图 1 中 E_1); 继续向前时, 一部分水沿侧积泥岩上倾方向运动, 在一定压力下造成回转(见图 1 中

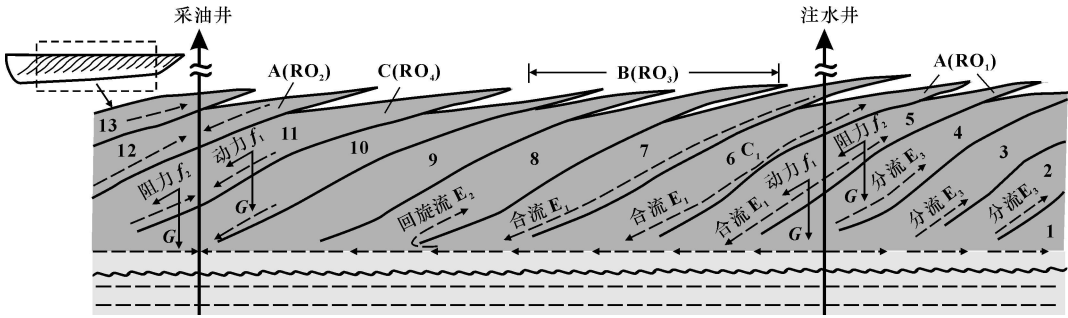


图 1 曲流点坝侧积泥岩薄夹层构形及其对注入剂驱油、剩余油形成与分布的影响
Fig. 1 Meandering Point Bar Side-Accumulation Mudstone Thin Interbeds Effect Aiming at Impregnant Edge Water Encroachment, Residual Oil Formation and Distribution

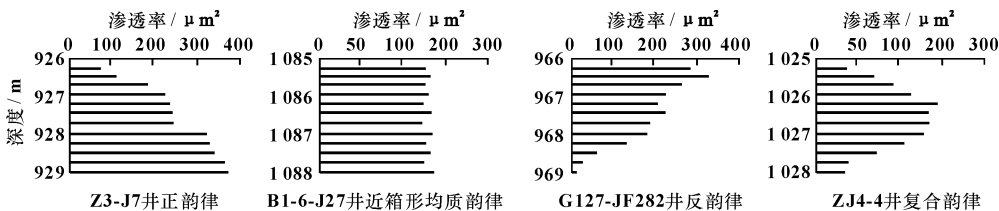


图 2 渗透率垂向差异、韵律性模式

Fig. 2 Rhythmic Mode Map of Permeability Vertical Discrepancy

E₂)；而沿倾向反方向运动时，沿砂体下部运动的水将沿侧积泥岩上倾方向分流(见图 1 中 E₃)，大部分水沿原来的方向继续前进。

由此可见，由于不渗透曲流河点坝薄夹层的存在及其三维空间的构形，极大地改变了河流砂体内的油水运动规律，使其中流体不能象无泥质薄夹层存在时那样可以向平面任何方向上下渗流，而在砂体上部只能在两个向上倾方向合并的侧积泥岩所限定的狭窄范围内沿上倾、下倾及走向 3 个方向运动，极大地限制了流体渗流，并形成上倾岩性尖灭造成的高压或驱油动力不足、多层油水分离、重力阻力与动力等。在以往曲流河道砂体非均质性、地质建模及油水研究中^[7-9]，只注意渗透率在空间上的变化，忽视了极薄的侧积泥岩及其构形，由此可以看出，侧积泥岩薄夹层的空间构形对非均质性、地质建模及油水分析的影响不亚于渗透率，特别是与开发井眼不接触并被侧积泥岩所限定的井间侧积砂体中的流体，流动将更为困难。

1.2 曲流河点坝砂体内部渗透率的垂向分布差异性对注入剂驱油效率的影响

通过对密闭取心井(Z3-J7 井、B1-6-J27 井、G127-JG282 井和 ZJ4-4 井)12 个单砂体 300 多个密集样品 1500 多个数据分析得出：单砂体内部渗透

率垂向分布的差异性是控制层内注入剂驱油的关键性地质因素，各主要类型单砂体内部普遍存在由渗透率垂向分布的差异性控制的多个次级韵律(见图 2)，并多被薄夹层隔开，这些次级韵律及薄夹层的类型、结构形式、组合关系及特征极大地控制着层内注入剂驱油效率，并造成很大的差异性。

2 剩余油形成与分布的主控因素

曲流河点坝薄夹层可形成几种剩余油类型：

2.1 沿上倾方向形成岩性尖灭遮挡剩余油

侧积砂体两侧被侧积泥岩薄夹层遮挡，在上倾方向被泛滥平原泥遮挡，而形成上倾岩性尖灭遮挡(见图 1 中 A)。在注水过程中，因无泄油通道形成只注不采的高压剩余油(RO₁)，而其向下倾方向，与物性较好的下点坝连通。当尖灭方向无注水井只有采油井时，最后因驱动力不足，在尖灭处形成有采无注型尖灭剩余油(RO₂)。如 Z3-J7 井顶部 288 号样品(孔隙度 21.5%，渗透率 32×10⁻³ μm²)驱油效率仅 0.85%(图 3)。

2.2 井间侧积泥岩遮挡尖灭型剩余油

当开发井距大于侧积泥岩宽度时，井间侧积泥岩侧向遮挡，上倾尖灭的上点坝侧积砂体仅能通通的下点坝砂体而不能直接与开发井连通(见图 1

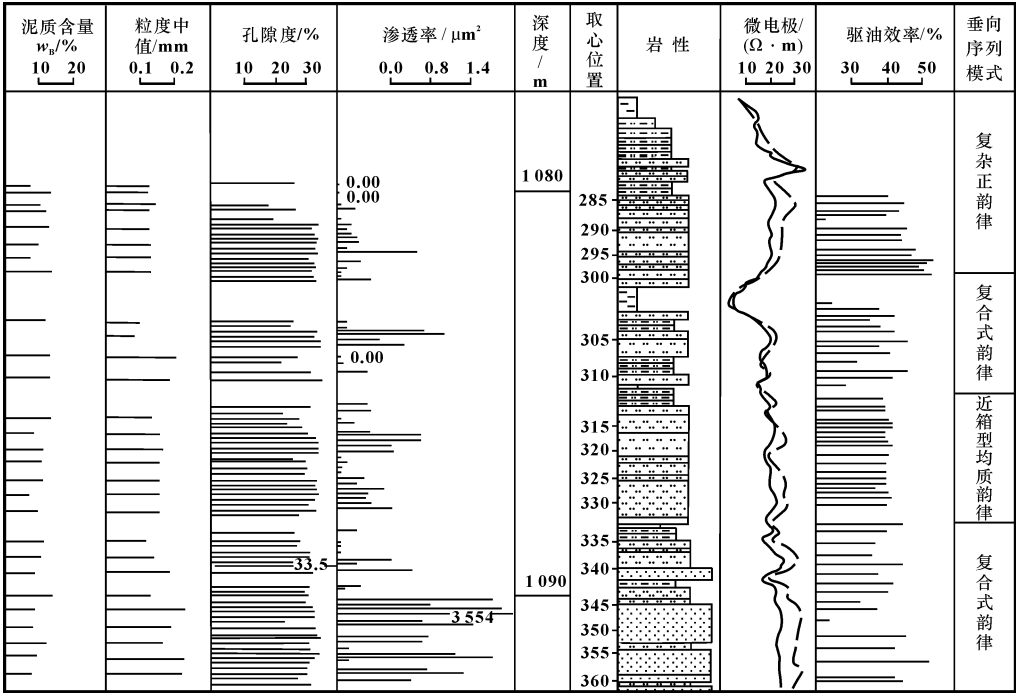


图 3 Z3-J7 井曲流型分流河道侧积体岩相、粒度、物性、驱油效率综合图

Fig. 3 Lithofacies Grains Scale Physical Property, and Oil Displacement Efficiency Collective

Diagram about Z3-J7 Well Meandering Type Distributary Channel Side Accumulation Body

中 B8、9 号侧积体), 从而形成较为可观的井间曲流过河点坝薄夹层侧积泥岩遮挡尖灭型剩余油(RO₃)。

2.3 多段重力分异型剩余油

由于曲流点坝侧积泥岩薄夹层底部阻隔, 使单砂体内形成垂向多段油水重力分异, 从而造成在同井同一侧积体内孔渗相同或相近的上下部位, 驱油效率上低下高, 形成多段重力分异型剩余油(RO₄) (图 1 中 C)。如 Z3-J7 井中部第 312 号样品(孔隙度 25.5%, 渗透率 $346 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和下部 348 号样品(孔隙度 23.5%, 渗透率 $295 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的驱油效率分别为 38.2%和 8.5%(见图 3)。

3 储层内部剩余油、驱油效率多段垂向序列模式

沉积理论认为: 单一河道砂体是由多次洪水事件形成的 4 级加积体按一定方式叠加而成, 每个 4 级加积体都有一定的岩相、物性规律, 是控制河道内部特征的重要基本单元。笔者用单砂体内部薄夹层构形理论, 在岩心岩相级精细观察描述、平面沉积微相精细研究、多方法单砂体内部薄夹层构形参数提取、建立地下单砂体内部构形的基础上, 对密闭取心井单砂体的粒度中值、粗粒级含量、泥质

含量、孔隙度、渗透率、原始含油饱和度、目前含油饱和度、驱油效率等与沉积微相、4 级加积体、4 级薄夹层及其空间构形密切结合, 综合分析单砂体内部剩余油、驱油规律, 在排除开发因素差异的同井单砂体的条件下, 提出单砂体内部薄夹层空间构形、渗透率垂向序列与重力因素共同控制剩余油分布、驱油效率多段垂向序列模式(图 4)。以往认为, 河道单砂体垂向上为下低上高的反韵律剩余油模式和下高上低上高的正韵律驱油效率模式^[10-13]。随着密闭取心井的增加、油田开发的持续、层内矛盾与差异的充分暴露, 出现了许多例外。在许多取心井中相继发现了上大、中小、下大的典型复合韵律模式、上中下近乎相等的近箱形模式以及因重力分异的多段韵律模式等。那么, 这些韵律模式为什么不符合正韵律模式呢? 是什么因素影响着层内剩余油与驱油效率? 笔者认为, 以往正韵律剩余油模式恰恰忽略了储层内部薄夹层空间构形这一重要因素, 仅考虑渗透率在储层中的垂向分布序列。所以, 一个完整的驱油效率模式应该是由单砂体内部薄夹层空间构形、渗透率亚序列及重力因素共同控制剩余油分布、驱油效率多段垂向序列模式。

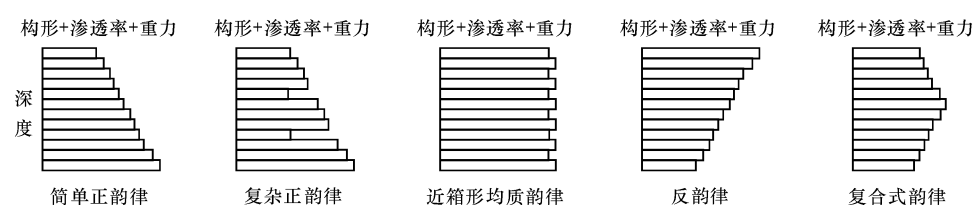


图 4 泥质薄夹层包裹的单一侧积体内部剩余油、驱油效率多段垂向序列模式

Fig. 4 Residual Oil and Multisection Vertical Model of Oil Displacement Efficiency in the Single Side Accumulation Body Which is Ladled by the Mudstone Thin Interbeds

4 结语

(1)采用砂体构形新理论, 在岩心、平面微相、地下构形参数提取与建模的基础上, 对密闭取心井单砂体的粒度中值、粗粒级含量、泥质含量、孔隙度、渗透率、原始含油饱和度、目前含油饱和度、驱油效率等与沉积微相、4 级加积体、4 级薄夹层及其空间构形密切结合, 综合分析单砂体内部剩余油、驱油规律。在排除开发因素差异的同井单砂体分析的条件下, 提出单砂体内部薄夹层空间构形+渗透率垂向序列+重力因素共同控制剩余油分布、驱油效率多段垂向序列模式。针对河道砂体, 发现并提出有悖于经典的驱油效率正韵律模式的复合韵

律、近箱形韵律、不规则多段等韵律模式。

(2)单砂体内部构形及薄夹层是控制层内注入剂及剩余油形成的最关键地质因素, 各主要类型单砂体内部普遍存在由内部构形控制的多个次级韵律, 并多被薄夹层分隔开, 这些次级韵律及薄夹层的类型、结构形式、组合关系及特征极大地控制着层内注入剂驱油及剩余油形成与分布, 同时也造成很大差异, 由此存在较大的开发潜力。对此, 建议除了进行聚合物驱油外, 开展按储层内薄夹层规模加密井网、河道砂体顶部水平井、注胶封隔、顶射顶注顶采、间歇气驱、层顶压裂等开发措施的研究。

(下转第 191 页)

余下滑力需要治理费用至少为 150 万元。由此, 各参数每增加一个单位对治理设计造价的影响见表 5。可见, φ_0 值的变化对设计造价的影响最大, c_0 、 c_{sat} 的影响最小, 且两者相差不大, φ_{sat} 的影响中等。

表 5 c 、 φ 值每增加 1 个单位对治理费用的影响

Tab. 5 Influence of Each Unit of c and φ Value on the Treatment Design

参 数	c_0/kPa	c_{sat}/kPa	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\varphi_{sat}/(\text{^\circ})$
稳定系数 k	+0.006	+0.006	+0.039	+0.021
剩余下滑力 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	-180	-200	-1220	-650
设计造价/万元	-270	-300	-1830	-975

4 结 语

通过工程实例表明, 在其他参数不变的条件 下, c_0 对稳定系数以及下滑力的影响与与 c_{sat} 基本 相近。 φ_0 对稳定系数及下滑力的影响比 φ_{sat} 显著。 φ 值对稳定系数以及下滑力的影响要明显高于 c 值。 每单位 φ_0 的增量所产生的影响是每单位 c 值 的增量所产生影响的 5 倍; 每单位 φ_{sat} 的增量所产 生的影响是单位 c 值的增量所产生影响的 2 倍。 这是由于 c 值所发挥的抗滑作用与滑动面形状和 上覆荷载没有关系, 只与滑动面面积有关, 而 φ 值

产生的抗滑力与滑动面形状、上覆荷载和面积都有 关系, 滑动面越缓, 上覆土层越厚, 面积越大, φ 值 发挥的抗滑力越大。 水位线以下则由于水下浮力 作用, 使滑体的有效重度减小, 因而使 φ 值的敏感 性降低。

由此可见, 滑面抗剪强度参数的选取对滑坡稳 定性的影响很大, 不同参数导致的稳定性分析结果 以及需进行的防护设计是完全不同的。 强度参数 选取不仅影响治理工程的安全性, 还直接影响治理 工程的造价。 因此, 在参数的选择上一定要慎重, 应该根据室内试验^[4]、大型原位剪切试验、已有工 程经验及参数反演分析^[5] 综合确定。

参考文献:

[1] 汪益敏, 苏卫国. 土的抗剪强度指标对边坡稳定分析的影响 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 22-25.

[2] 洪毓康. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

[3] 何清雨, 陈征宙, 周心经, 等. 三峡库区马家屋场一后坪滑坡成因及稳定性分析[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 19-23.

[4] 李巧梅. 试验室测试土的抗剪强度指标的方法及其应用[J]. 广东水利水电, 2000(1): 25-27.

[5] 刘天韵, 吕和林. 滑坡土体抗剪强度指标反算研究[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(3): 185-187.

(上接第 173 页)

参考文献:

[1] Miall A D. Architectural Elements and Boundary Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (lower Jurassic)[J]. Southwest Colorado, Sedimentary Geology, 1988, 55 (6): 233-262.

[2] 王国鹏, 何光玉. 双河油田厚油层内夹层分布特征[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 55-59.

[3] 张吉, 张烈辉. 陆相碎屑岩储层隔夹层成因、特征及其识别[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 221-224.

[4] 崔文富. 反韵律厚油层夹层分类及纵向剩余油分布模式[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 52-56.

[5] 于波, 付国民, 李永军, 等. 樊家川油田河流相储层高分辨率层序地层特征[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 53-58.

[6] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 第 1 版. 北京: 石油工业出版社, 1991.

[7] 党 莹, 赵 虹, 姜常义. 塔里木盆地东北部侏罗系烃源岩特征及初步评价[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 1-5.

[8] 常象春, 王明镇, 韩作振. 试论适合叠合盆地的油源对比方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 32-36.

[9] 高兴军, 宋子齐, 谭成仟. 真 12 块垛一段六油组隔夹层划分及描述[J]. 西安石油学院学报, 2000, 15(5): 10-14.

[10] 吕晓光, 马福士, 田东辉. 隔层岩性、物性及分布特征研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 80-88.

[11] 蒲 军, 张金川, 王志欣, 等. 川西坳陷深盆气研究进展与问题讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 34-37.

[12] 刘克奇, 杨喜峰, 杨春梅. 东濮凹陷卫城 81 断块沙四段第二砂层组储层非均质性研究[J]. 断块油气田, 2004, 11(4): 55-57.

[13] 谭成仟, 马娜蕊, 苏 超. 储层油气产能的预测模型和方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 42-46.

[14] Hearn C L, Ebanks W J. Geological Factors Influencing Reservoir Performance of the Hartaog Dra field [J]. Wyoming Petrol Tech, 1984, 36(8): 1335-1334.

[15] Geehan G W. Geologic Prediction of Shale Continuity, Prudhoe Bay Field: Reservoir Characterization [M]. Academic Press, 1986.