

特低渗透油藏分类及开采特征研究

王文环 袁向春 王光付 廖荣风

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 分析了特低渗透油藏地质特征参数、油藏特征参数以及流固耦合特征参数, 应用非达西渗流理论和非线性弹性渗流理论研究了影响开发效果的参数。在此基础上, 确定了分类参数, 对特低渗透油藏进行了系统的分类; 并通过分析不同类型特低渗透油藏开采特征的异同, 证实了分类指标的代表性; 分析了造成不同类型油藏驱替及开采特征差异的内在因素是启动压力梯度、毛细管压力和储层的压力敏感性; 提出了在异常高压油藏开发过程中, 应控制合理生产压差、保持适当地层压力开采等防止压力敏感性伤害的措施。

关键词: 低渗透油气藏; 非达西流; 油气藏类型; 启动压力

中图分类号: TE348 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890 (2007) 01-0072-04

截止2005年底, 中国石化已探明的砂岩特低渗透石油地质储量为 4.8269×10^8 t, 占中国石化总探明石油地质储量的7.6%, 占砂岩低渗透油藏储量的40.2%。但动用程度还比较低, 动用储量仅为 2.1251×10^8 t, 开发效果较差, 具有很大的开发潜力; 且尚有 2.7018×10^8 t的特低渗透油藏储量没有动用。因此, 随着油田勘探开发程度的提高和开发技术的进步, 特低渗透油藏的开发越来越重要。

从目前已开发的81个单元来看, 开采特征差异较大, 存在的矛盾和暴露的问题亦不同。因此, 对特低渗透油藏进行分类, 研究不同类型特低渗透油藏的开采特征及影响因素, 对研究不同类型特低渗透油藏有效开发技术, 提高中国石化特低渗透油藏开发效果具有重要的意义。

1 特低渗透油藏特征及分类

1.1 油藏分类原则及目的

影响特低渗透油藏开发效果的主客观因素和考虑的单因素分类类型很多。笔者为了进一步分析制约分类油藏开采特征和开发效果的内在因素, 制定不同的开发对策, 主要依据影响开发效果和相应经济指标的地质和油藏客观因素进行分类。

1.2 油藏体系特征参数分析

油藏开发过程实际上是流体在多孔介质中的渗流过程, 其渗流特征取决于渗流三大要素的变化。首先是渗流的环境, 即多孔介质, 主要是多孔介质的孔隙结构和物理化学性质; 其次是流体, 主要是流体的组

成和物理化学性质; 再次是流动的状态, 主要是流动的环境、条件和流固体之间的相互作用, 这三大因素决定着流体渗流规律和油藏开发效果^[1-2]。因此, 影响油藏开发效果的分类指标体系亦可相应地概括为三大类: 一是油藏地质特征体系, 如储层的沉积成因特征、储层的孔喉结构特征以及裂缝发育特征等; 二是油藏特征体系, 主要包括油田流体系统、地层压力系统及驱替能量等特征; 三是流固耦合特征体系, 即润湿性特征和压力敏感性特征。

1.2.1 地质特征体系参数分析

从油藏地质特征体系来看, 特低渗透储层的形成与沉积作用、成岩作用和构造作用密切相关^[2]。根据上述不同地质因素在低渗透储层形成过程中控制作用的大小, 可将特低渗透砂岩储层分为原生特低渗透储层、次生特低渗透储层和裂缝性特低渗透储层。但原生和次生特低渗透储层对开发效果的影响主要通过渗透率指标来体现。

1.2.2 油藏特征体系参数分析

从油藏特征体系来看, 我国特低渗透油藏流体性

收稿日期: 2006-09-30; 改回日期: 2006-11-20

基金项目: 中国石油化工股份有限公司“十一五”重点科技攻关项目“特低渗透砂岩油藏有效开发技术研究”(编号: P05068)部分研究成果

作者简介: 王文环(1965—), 女, 1991年毕业于石油大学(华东)地质勘查系, 2000年获石油大学(华东)油田开发工程专业硕士学位, 2004年获石油大学(华东)油气田工程专业博士学位, 高级工程师。

联系电话: (010) 51616598

质和驱替能量差异不大, 原油性质一般都比较好, 其特点是密度小、粘度低、含胶质和沥青少, 另外凝固点较高、含蜡量较大。油藏基本上都为低饱和油藏, 驱替能量主要为弹性驱动。但地层压力系统差异较大, 压力系数在 0.61~2.22 之间。

1.2.3 流固耦合特征体系参数分析

从流固耦合特征体系来看, 流固耦合特征主要表现为流体与流动环境之间的关系, 首先是流体与岩石之间的亲和性, 即润湿性。统计表明, 我国特低渗透砂岩油层润湿性以亲水为主^[2]; 二是在油藏开采过程中, 由于地层压力改变所引起的储层结构变化, 而这种变化又必然反作用于储层内流体的渗流, 影响到流体的渗流状态, 这是一种流固耦合过程^[3]。由此可见: 储层的变形是一种被动的变化, 其变化程度和类型取决于主动因素(主要是地层压力)的变化情况, 即压力系统是影响储层压力敏感性的重要因素, 异常高压油藏的储层变形比常压油藏储层变化明显得多^[4-6]。因此, 影响特低渗透油藏开发效果的流固耦合特征体系参数主要为地层的压力系数。

1.3 影响特低渗透砂岩油藏开发效果因素分析

1.3.1 驱替特征影响因素分析

应用非达西渗流理论, 在建立非达西渗流数学模型的基础上, 通过求解不同条件下水驱前缘含水饱和度和驱替相压力分布情况来分析影响特低渗透油藏驱替效果的主要因素。求解结果表明: 启动压力梯度和毛管力是影响特低渗透砂岩油藏驱替效果的主要因素。首先, 启动压力梯度的存在造成了见水前缘平均含水饱和度的降低和驱替相压力的升高(如图 1、2 所示, 图中 G 为启动压力梯度)。同时, 毛管力的存在能使含水饱和度前缘超前, 水淹区内的含水饱和度趋于均匀, 同样亦造成驱替相压力的增加(如图 3、4 所示)。总之, 启动压力梯度和毛管力的存在使特低渗透砂岩油藏油井见水早, 含水上升快; 注水井注水困难, 驱替效果变差, 即渗透率是油藏开发效果好坏的决定因素。

1.3.2 开采特征影响因素分析

应用非线性弹性渗流理论, 在建立非线性弹性渗流数学模型的基础上, 通过求解不同渗透率变化系数条件下地层压力的分布情况来研究影响特低渗透变形介质油藏开发特征的主要因素。

求解结果表明: 在定产条件下, 地层渗透率变化系数越大, 地层压力降低越急剧(如图 5 所示, 图中 α_{ko} 为渗透率变化系数, 下同); 当井底流压一定时, 变形越严重的油藏产量越低, 而当产量一定时, 变形

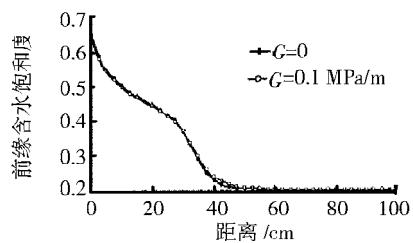


图 1 启动压力梯度对前缘含水饱和度分布的影响

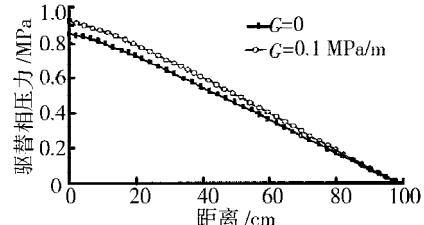


图 2 启动压力梯度对驱替相压力分布的影响

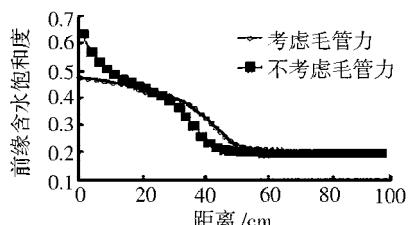


图 3 毛管力对前缘饱和度分布的影响

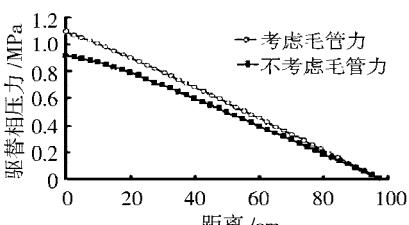


图 4 毛管力对驱替相压力分布的影响

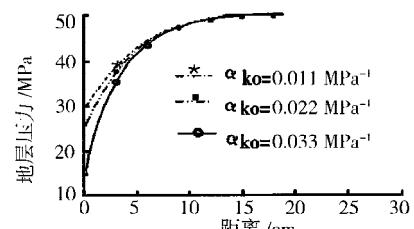


图 5 不同渗透率变化系数下地层压力分布曲线

越严重的油藏井底流压越低, 即生产压差越大(如图 6 所示)。由此可见: 油藏的产量和产量递减速度是

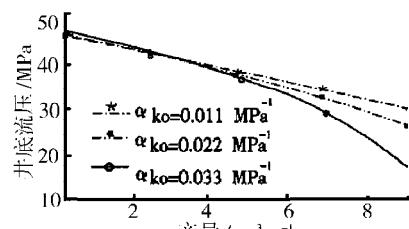


图 6 生产井指示曲线

受油藏弹塑性影响的, 弹塑性越大, 产量递减越快。而油藏的弹塑性除了与储层的孔隙结构有关外, 与油藏的压力系统有着直接的关系, 即高压、常压、低压系统在一定程度上反映了油藏的弹塑性^[7]。因此, 油藏压力系数是影响油藏开发效果的重要因素之一。

1.4 特低渗透砂岩油藏分类参数的确定

影响特低渗透油藏驱替特征的主要因素, 首先为启动压力梯度和毛细管压力, 启动压力梯度是流度的幂函数^[8-9]。特低渗透油藏渗透率为 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原油粘度一般为 $0.50 \sim 12.16 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 渗透率和原油粘度的变化范围很小, 就不再进行细分; 毛细管压力的大小主要受润湿性和渗透率主控参数孔喉半径大小的影响, 特低渗透油藏几乎均为亲水性^[10], 亦不再细分, 因此影响开发效果的主要地质参数为裂缝的发育。

其次为油藏的弹塑性, 即压力敏感性。储层的压力敏感性除了受渗透率(孔喉半径)的影响外, 还受地层压力系统影响, 压力系统是由不同压力系数来表示的。因此, 压力系数是油藏分类的主要指标之一。另外, 特低渗透油藏埋深变化范围较大($1\ 300 \sim 4\ 000 \text{ m}$), 是影响油藏经济效益的主要参数。

综合以上分析可见, 特低渗透油藏主要的分类参数为压力系数、油藏埋深以及裂缝是否发育。

1.5 特低渗透砂岩油藏分类

1.5.1 油藏压力系统分类

根据油藏原始地层压力分布情况, 将油藏原始地层压力系数小于 0.8 的称为低压油藏, 压力系数 $0.8 \sim 1.2$ 的称为常压油藏, 压力系数 $1.2 \sim 1.8$ 的称为高压油藏, 压力系数大于 1.8 的称为超高压油藏^[7], 则特低渗透油藏可划分为常压特低渗透油藏、低压异常特低渗透油藏、高压异常特低渗透油藏和超高压异常特低渗透油藏 4 种类型。

1.5.2 油藏埋藏深度分类

依据油藏埋深进一步将油藏分为 4 种类型, 即: 浅层油藏、中深层油藏、深层油藏及超深层油藏。其中浅层油藏埋藏深度小于 $2\ 000 \text{ m}$, 中深层油藏埋藏深度为 $2\ 000 \sim 3\ 000 \text{ m}$, 深层油藏埋藏深度为 $3\ 000 \sim 4\ 000 \text{ m}$, 超深层油藏埋藏深度大于 $4\ 000 \text{ m}$ 。

1.5.3 油藏裂缝分类

根据裂缝发育情况可将油藏分为裂缝型特低渗透砂岩油藏和非裂缝型特低渗透砂岩油藏两种。

1.5.4 油藏分类结果

综合以上各分类参数分类结果, 特低渗透砂岩油藏总共可细分为 32 种。但根据中国石化 81 个开发单

元的实际情况, 主要存在裂缝性浅层低压特低渗透砂岩油藏、裂缝性中深层常压特低渗透砂岩油藏、裂缝性深层高压特低渗透砂岩油藏 3 种类型。

2 不同类型特低渗透砂岩油藏开采特征

2.1 产量递减规律异同

分析可知, 不同类型特低渗透油藏产量递减均符合指数函数递减规律, 但不同类型油藏初始递减产量和初始递减率差异较大。深层高压特低渗透砂岩油藏初始产量高, 递减快, 初始递减产量为 17.6 t/d , 初始年递减率为 21.9%; 中深层常压特低渗透砂岩油藏初始产量较之高压特低渗透砂岩油藏低, 递减慢, 初始递减产量为 10.5 t/d , 初始年递减率为 12.8%; 浅层低压特低渗透砂岩油藏初始递减产量最低, 递减最慢, 初始递减产量为 2.1 t/d , 初始年递减率为 8.5%。

2.2 含水上升规律异同

通过对不同类油藏含水上升规律的分析可知, 不同类型特低渗透砂岩油藏普遍具有无水采油期短的特点, 但不同类型特低渗透砂岩油藏含水上升速度差异较大。深层高压特低渗透砂岩油藏含水上升快, 含水上升率为 7.6%; 中深层常压特低渗透砂岩油藏和浅层低压特低渗透砂岩油藏含水相对深层高压特低渗透砂岩油藏上升较慢, 含水上升率分别为 2.8%、3.7%。

2.3 注水井注水特征异同

不同类型特低渗透砂岩油藏普遍具有注水井吸水能力差、启动压力和注水压力高且上升快的特点。特低渗透砂岩油层渗流阻力大, 传导能力差, 注水能量很难传导扩散, 导致特低渗透油层吸水的启动压力一般较高。再加上地层中粘土矿物膨胀和水质不配伍等因素引起的油层伤害使吸水指数下降, 致使注水井压力上升很快, 在注水井附近憋成高压区, 降低了有效注水压差, 造成了注水量的递减。

3 结论与认识

1) 应用压力系数进行油藏分类, 不同类型特低渗透油藏开采特征具有明显的差异, 说明分类参数指标具有代表性, 是决定油藏开发效果的主控客观因素。

2) 异常高压特低渗透砂岩油藏渗透率变化系数大, 在生产过程中, 随着地层压力的下降, 渗透率降低, 启动压力梯度、毛管力升高, 渗流阻力增加, 从而导致其产量递减加快。

3) 启动压力梯度和毛细管压力的存在是特低渗透砂岩油藏见水早、无水采油期短、含水上升快、注入压力高的内在因素。异常高压特低渗透油藏的降压开采极易造成渗透率的急剧下降, 从而导致启动压力梯度、毛细管压力升高, 因此造成高压特低渗透油藏含水上升速度比常压、低压特低渗透砂岩油藏快。

4) 异常高压油藏其压力敏感性最强, 降压开采对储层造成的伤害最大, 为防止储层伤害, 必须控制合理的生产压差和保持适当的地层压力开采。

参 考 文 献

- [1] 黄延章. 低渗透油层渗流机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [2] 李道品. 低渗透砂岩油田开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

- [3] 薛定鄂 A E. 多孔介质中的渗流物理 [M]. 王鸿勋, 张朝琛, 孙书琛, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- [4] 宋付权. 变形介质低渗透油藏的产能分析 [J]. 特种油气藏, 2002, 9 (4): 33-35.
- [5] 王江, 王玉英. 异常高压、特低渗透油藏储层压力敏感性研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22 (5): 28-31.
- [6] 唐汝众, 李根生. 双重介质低渗透储层压裂诊断与施工工艺 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (4): 57-59.
- [7] 唐泽光. 气田开发地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [8] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29 (2): 86-89.
- [9] 张嵇南, 董国昌. 低渗低孔低产能油田钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 1999, 27 (4): 12-14.
- [10] 周全兴, 崔士斌. 水平井开发低渗透油藏的研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 1999, 27 (1): 46-48.

[审稿 吴晓东]

Classifications and Development Characteristics of Ultra-Low Permeability Reservoirs

Wang Wenhuan Yuan Xiangchun Wang Guangfu Liao Rongfeng

(Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083, China)

Abstract: The geological characteristics, reservoir characteristics, fluid-solid coupling parameters of ultra-low permeability reservoir are analyzed. The parameters impacting the development results are investigated using theory of non-Darcy porous media flow and nonlinear elastic porous media flow. Based on this the calcification parameters were determined. The ultra-low permeability reservoir has been classified systematically. Through analysis the similarity and difference of development characteristics in different type ultra-low permeability reservoirs, calcification parameters were verified. The internal reasons to cause the difference in the displacement and development of different reservoirs are start-up pressure gradient, capillary force and reservoir pressure sensitivity. In the development of the reservoirs with ultra-high pressure, the reservoir pressure has to be maintained and reasonable pressure difference has to be controlled to prevent the pressure sensitivity damage.

Key words: low permeability pools; non-Darcy flow; reservoir type; starting pressure

《石油钻探技术》编辑部向部分读者、作者赠送本刊全文检索光盘

本刊编辑部在重庆维普资讯有限公司的帮助下, 将《石油钻探技术》1991~2005 年共 1873 篇文章及信息制成了基于 Windows 操作系统的全文检索光盘(单机版), 具有检索速度快、使用操作简单、功能强大等优点, 采用 PDF 全文浏览器, 可方便对文章浏览、打印、文本识别、图像截图等。

为了感谢广大读者、作者多年来对本刊的支持和厚爱, 同时, 为了解决广大石油工程技术人员在撰写论文、科技报告、技术总结时普遍存在的资料缺乏的问题, 本刊编辑部将向部分读者、作者赠送本刊全文检索光盘(单机版), 凡是近年来在本刊发表过论文、订阅过期刊的石油工程技术人员均可以申请索要本刊全文检索光盘(单机版), 请将您的详细联系方式、单位、职务、职称、电话、电子邮箱地址、专业领域等信息用 E-mail 发给我们(chenhuinian@163.com), 由于光盘数量有限, 我们会从中选出部分技术人员赠送本刊全文检索光盘。我们希望您积极向您身边的同事、朋友宣传本刊, 努力提高本刊的知名度, 同时在撰写论文、科技报告、技术总结时多参考引用本刊曾经刊发过的论文。