

文章编号: 1009-3850(2002)04-0050-05

樊家川油田储层渗流单元分析及其剩余油分布

石京平¹, 李永军², 付国民¹

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 长安大学, 陕西 西安 710050)

摘要: 樊家川油田已进入开发后期, 为了精确预测层内剩余油潜力, 解剖更小级别的储层非均质单元分布, 在储层沉积微相研究的基础上, 应用储层 FZI 值进行单一河流沉积单元的渗流单元划分, 并讨论了成因砂体与渗流单元的关系以及渗流单元中剩余油分布规律, 从而提高了剩余油预测的精度。

关键词: 渗流单元; 剩余油分布; 樊家川油田; 陕北

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

1 引言

樊家川油田位于陕北斜坡与天环坳陷过渡部位——樊家川鼻状构造南部。它整体为一轴部平缓、两翼较陡的穹隆状构造, 主要储集层系为侏罗系延安组的延 9 油层, 总体为一套河流沼泽相的陆源碎屑含煤建造, 可细分为 3 个成因单元及 6 个单一河流沉积单元。经过十余年的注水开发, 油田已进入高含水后期开采阶段, 层间、平面矛盾极其突出, 产量锐减, 采出程度仅为 14%。因此, 进行更深层次储层非均质表征, 精细找出剩余油分布规律, 是油田开发和综合调整当务之急。

多年来通过对油水运动分析发现, 纵向上流体流动受控于连续分布的薄夹层, 平面上流体流动受控于成因砂体的排列及其内部物性参数的非均质分布。随着油田开发深度的加深, 相应地要求对地下水分布认识深入到最小流动单元内部, 而以单砂层及单砂体为流动单元的油藏地质模型显然满足不了精细数值模拟的要求, 其忽略了内部非均质信息, 无法体现非均质性对油水运动的影响。因此, 在开发中后期, 有必要在单层及单砂体内部划分更小的非均质单元。这种更小的非均质单元, 纵向上被相

对稳定的夹层封闭及不完全封闭, 平面上由微相和储层渗流参数变化所分割, 称为“渗流单元”。

渗流单元在侧向上和垂向上连续并具有相同的影响渗流特征参数, 是储集体内具有相似岩性和物性的储集单元, 是储层渗流屏障和非均质性的具体反映, 每一个渗流单元代表一个特定的沉积环境和渗流特征^[1,2]。

2 渗流单元划分方法

根据孔隙几何特征的变化, 可以把储层划分为流体渗流特征相似的若干单元, 孔隙几何形态是岩石矿物成分和结构的函数^[3]。为了定量划分渗流单元, 前人提出平均水力单元半径的概念, 这一概念将渗流单元和相关的孔隙度、渗透率联系起来, 为我们提供一条应用孔隙度、渗透率参数定量划分微观上渗流特征相似的渗流单元的有效途径。亦即采用流动层段指标 FZI 来划分渗流单元。

FZI 由下式求出:

$$FZI = RQI / \phi_z \quad (1)$$

$$RQI = 0.0314 (K / \phi_e)^{1/2} \quad (2)$$

$$\phi_z = \phi_e / (1 - \phi_e) \quad (3)$$

其中, RQI 为储层质量指标 (μm); ϕ_z 为孔隙体积与颗粒体积之比; ϕ_e 为有效孔隙度 (小数); K 为渗透率 (M_d)。

由 (1) 式得: $\text{LogRQI} = \text{Log}\phi_z + \text{LogFZI}$

在 RQI 和 ϕ_z 的双对数关系图上, 具有相同和相似的 FZI 的所有样品将落在同一斜率的一条直线上, FZI 常数值可由直线的截距确定。这样, 落在同一条直线上的样品具有相同和相似的孔喉特征, 因而属于同一渗流单元。通过统计分析和地质解释相结合的方法, 可以确定砂体内部的渗流单元数目及各类渗流单元的 FZI 指标界限, 从而定量划分储层渗流单元。

3 樊家川油田储层渗流单元的划分与描述

储层内的渗流单元受沉积过程中水动力条件控制, 它与储层的岩石成分、物性特征、毛管压力等有关。统计分析岩心分析数据和压汞资料, FZI、RQI、 ϕ_z 、 ϕ_R 与孔隙度、渗透率、排驱压力、平均喉道半径和退录效率相关性很好 (图 1, 图 2, 图 3, 图 4), 从这几个图中得知, FZI、RQI、 ϕ_z 、 ϕ_R 这 4 个参数综合反映了储层岩性、物性特征、岩石微观孔隙结构特征, 用这些参数划分储层渗流单元是可行的。

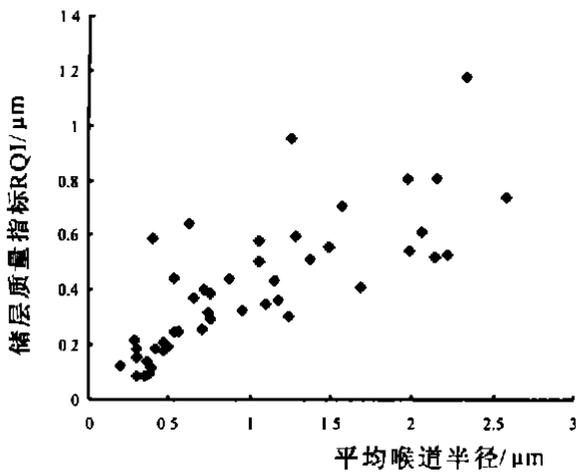


图 1 RQI 与平均喉道半径相关图

Fig. 1 The correlation of reservoir quality indicators (RQI) (μm) and average throat radius (μm)

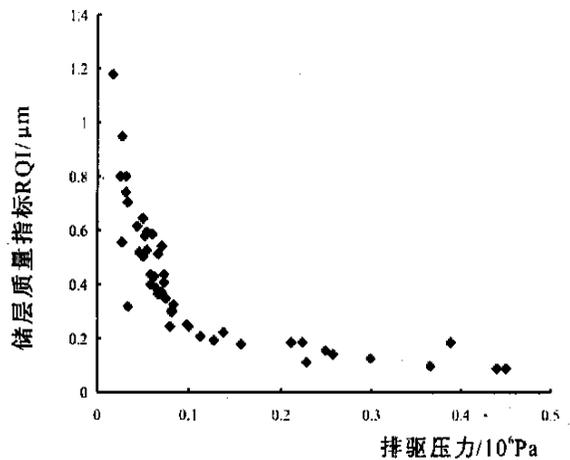


图 2 RQI 与排驱压力相关图

Fig. 2 The correlation of reservoir quality indicators (RQI) (μm) and driving pressures (10^6Pa)

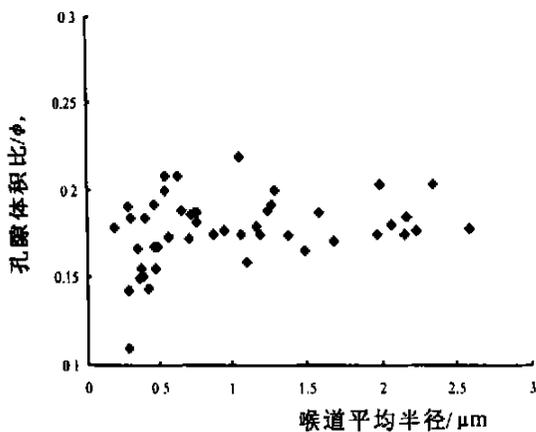


图 3 喉道平均半径与孔隙体积比相关图

Fig. 3 The correlation of average throat radius (μm) and porosity volume percentage (ϕ_z)

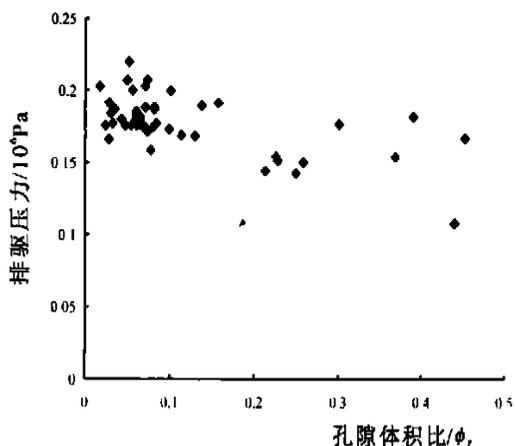


图 4 排驱压力与孔隙体积比相关图

Fig. 4 The correlation of the driving pressures (10^6Pa) and porosity volume percentage (ϕ_z)

根据樊家川油田地质及开发动态特征,利用该区6口取心井546个岩心分析数据作样本,计算每个样本点的FZI、RQI、 ϕ_z 、 ϕ_R ,进行快速样本聚类分析(图5)。从聚类谱系图中可以看出,该区储层可以分为4类渗流单元。随后进行的详细分层聚类分析4类储层渗流单元FZI平均值为1.5、4.6、7.6、11.8。综合考虑物性、岩性,笔者对各类渗流单元分界线进行了适当调整,确定了四类渗流单元FZI分界线(表1)。

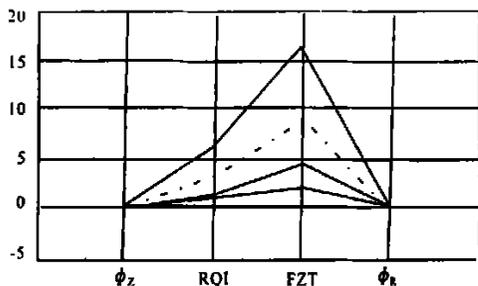


图5 FZI、RQI、 ϕ_z 、 ϕ_R 参数k-means聚类图

Fig. 5 The k-means cluster plot for the FZI, RQI, ϕ_z and ϕ_R parameters

通过绘制 $\text{LogRQI}-\text{Log}\phi_z$ 散点图(图6),4个渗流单元可以比较明显地被区分,即分布于簇斜率为一的直线附近。根据上述划分标准,应用该区100余口井测井解释及地质分析结果,在沉积微相及单一河道砂体识别的基础上,对Y9油组各单一河流沉积单元平面渗流单元进行分析(表2,图7)。

在对储层渗流单元划分之后,发现渗流单元与成因砂体并不是一一对应关系。也就是说,某一种渗流单元可以存在于几种成因砂体之中,某一种成因砂体可以包含几种渗流单元类型。研究表明,主河道砂体及心滩砂体以一类及二类渗流单元为主,仅砂体边部局部分布有三类零星渗流单元,废弃河道砂体以二类及三类渗流单元为主,河道间砂体大部分为三类渗流单元,二类渗流单元零星出现。

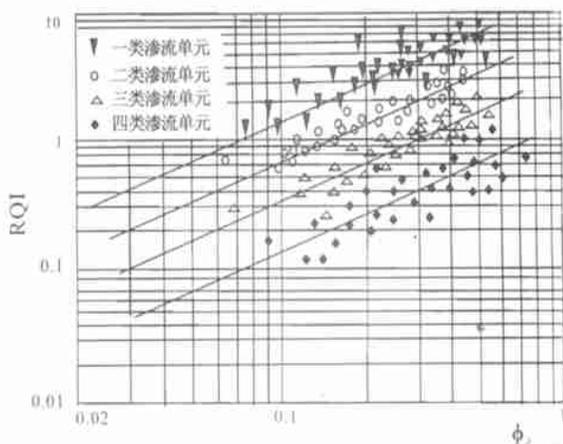


图6 各类渗流单元RQI与 ϕ_z 聚类分析谱系图

Fig. 6 Cluster plot for the RQI and ϕ_z values for individual permeable units

主力层Y922-2渗流单元连片性较好,Y911-2、Y922-1、Y933-1、Y933-2以二类渗流单元为主,一类及三类渗流单元部分连片分布,Y911-1以三类渗流单元为主,二类零星分布。此外,各单元靠近南部物源渗流单元多以一类及二类为主,储层流通性较好;靠近北部则以三类渗流单元占主体,储层储集性及渗流性较差。

从渗流单元分布图可以看出,渗流单元分布极其复杂,各类型渗流单元相间分布,表现出极强的非均质性,一般的一类及二类渗流单元相邻分布,且沿主河道砂体呈带状分布,中间局部区域可能被零星分布的三类渗流单元分割。在河道砂体及心滩砂体侧缘,主要由三类渗流单元组成。横向上,一类、二类渗流单元与三类渗流单元相互拼接,在大片以三类渗流单元为主的河道间砂体发育地带,间夹决口扇、废弃河道等成因的二类零星渗流单元。从渗流单元规模看,只有一类及三类渗流单元可形成大规模的连续特征,二类渗流单元之间不连续,影响了注入水的波及体积。

表1 樊家川油田渗流单元划分参数表渗流单元

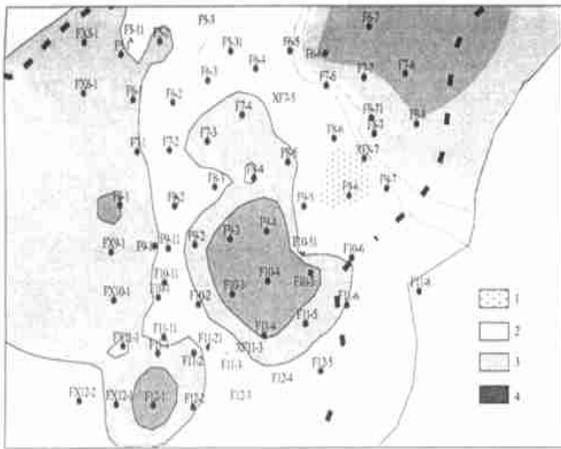
Table 1 The parameters applied to the division of the permeable units in the Fanjiachuan Oil Field

渗流单元	FZI	ϕ_z	RQI	ϕ_z	ϕ	K
一类	> 7	0.178	1.599	0.512	0.14~0.16	> 200
二类	4~7	0.170	0.926	0.501	0.13~0.15	100~200
三类	2~4	0.165	0.523	0.481	0.12~0.14	20~100
四类	< 2	0.157	0.206	0.361	0.11~0.14	0.1~20

表2 樊家川油田各成因单元渗流单元分布特征

Table 2 Distribution of the permeable units in the Fanjiachuan Oil Field

沉积单元	一类渗流单元	二类渗流单元	三类渗流单元
Y91 ¹⁻¹		零星分布	呈主体, 带状分布
Y91 ¹⁻²	有限连片, 局部零星	呈主体, 大片连片	有限连片, 局部零星
Y92 ²⁻¹	有限连片, 局部零星	呈主体, 大片连片	有限连片, 局部零星
Y92 ²⁻²	条带分布, 约为 1/3	有限连片, 约为 1/3	大片连片, 约为 1/3
Y93 ³⁻¹	有限连片	呈主体, 大片连片	有限连片, 局部零星
Y93 ³⁻²	有限连片, 局部零星	大片分布	大片条带分布

图7 Y9¹⁻²砂体渗流单元分布图

1. 第四渗流单元; 2. 第三渗流单元; 3. 第二渗流单元; 4. 第一渗流单元

Fig. 7 Distribution of the permeable units in the Y9¹⁻² sandstones

1= No. 4 permeable unit; 2= No. 3 permeable unit; 3= No. 2 permeable unit; 4= No. 1 permeable unit

4 渗流单元与剩余油分布关系

国内外研究表明, 不同类型的渗流单元具有不同的渗流能力。注水动态分析亦表明, 注水见效方向及水淹扩大区多沿物性好、流动能力强的渗流单元方向流动, 特别是长期注水会沿该方向形成高渗通道, 从而使通道附近水淹程度高, 而其它方向水淹程度低或未水淹, 从而形成剩余油。平面上, 剩余油多分布于流动单元级别低的三四类渗流单元内或注采井网不完善区域^[4]。

通过上述研究可以看出, 流动单元是储层渗流能力的综合反映, 通过渗流单元分级可将储层在微相划分的基础上进一步细分。研究表明, 渗流单元与剩余油分布存在着密切的关系, 存储型和渗透性

好的渗流单元易形成通道, 造成油井很快水淹; 相反, 存储型和渗流性差的流动单元对油水运动起着阻挡作用, 使其附近容易形成剩余油。

如研究区 Y9-1b 小层的 6-4 和 6-6 两口生产井与注水井 6-5 井处在同一井排上(图 7)。这两口采油井与注水井的距离基本相同, 约为 290m。从构造图和注采关系上看, 6-4 井周围有两口注水井(6-5 井和 6-3 井), 且处在高注低采的不利部位, 而 6-4 井周围只有一口注水井, 且处在低注高采的有力部位。从储层上看, 尽管这三口井在该层处在同一河道砂中, 但他们所处的流动单元级别不同, 6-4 井和 6-5 井为三类流动单元, 而 6-6 井为一类流动单元。6-4 井于 1988 年 5 月投产, 射开砂岩厚度 6.4m, 初含水为 5.8%; 6-6 井于 1990 年 5 月投产, 射开砂岩厚度 10m, 初含水为 5.1%。两口井初含水基本相同。6-5 井于 1988 年 5 月开始注水, 射开砂岩厚度 11m, 到 2001 年 5 月累计注水量为 $21.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。尽管 6-4 和 6-6 两口生产井所处的沉积微相、与注水井的距离、射开层位及初含水等参数都相同, 但由于 6-4 和 6-6 两口生产井所处的渗流单元不同, 在生产动态上表现出不同的特征。如处在三类渗流单元的 6-4 井, 进入中含水期(含水率为 40%)的时间为 7 年零 4 个月; 而处在一类渗流单元的 6-6 井, 进入中含水期(含水率为 40%)的时间仅为 4 年, 而且 6-6 井于 1998 年 11 月因套损关井, 关前含水为 84.7%, 累计产油 $2.12 \times 10^4 \text{ t}$ 。而同期处于渗流单元三类的 6-4 井含水为 71.3%, 累积产油 $2.84 \times 10^4 \text{ t}$ 。

上述结果表明, 6-5 井注入水主要沿着渗流单元好的 6-6 井方向推进, 致使该井过早水淹。

另外, 研究区 Y9-1b 小层的 9-5 和 10-5 两口生产井虽然处在同一河道中, 但他们所处的渗流单元级别不同。其中, 9-5 井处在三类渗流单元, 而 10-5 井处在一类渗流单元, 它们在生产动态上表现出不同的特征。尽管 9-5 井周围有 5 口注水井在注水,

而且 8-4、8-5、8-6、10-4 四口注水井处在构造高部位,对 9-5 生产井形成高注低采,但由于 9-5 井处在流动性较差的三类渗流单元,所以注入水沿 9-5 井方向推动速度慢,该井进入中含水期的时间为 8 年零 6 个月,到 2001 年 5 月份含水为 74.7%。而处在流动性好的 10-5 井进入中含水期的时间仅为 1 年半,投产三年含水达到 96.8%,到 1994 年 6 月因高含水而计划关井。

以上实例表明,生产井和注水井储层质量的好坏、物性差别的大小,对开采状况的影响程度是较大的;从渗流单元的角度评价储层,可以帮助油藏工程

师更好地分析开发过程中存在的问题。

参考文献:

- [1] 魏斌,陈建文,李胜军,等.应用储层流动单元研究高含水油田剩余油分布[J].地学前沿,2000,7(4):403-410.
- [2] 称程,孙义梅,黄翔.双河油田储层渗流单元分析及应用[J].现代地质,2000,14(4):440-444.
- [3] 马立详.岩石物理流动单元的给念及其研究现状[J].天然气地球科学,2000,11(2):31-36.
- [4] 冀之林.储层流动单元研究[M].北京:石油工业出版社 2000,97-112.

The analysis of permeable units of the reservoir rocks and distribution of the residual oil in the Fanjiachuan Oil Field, northern Shaanxi

SHI Jing-ping¹, LI Yong-jun², FU Guo-min¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710050, Shaanxi, China)

Abstract: The Fanjiachuan Oil Field lies at the juncture of the northern Shaanxi slope and Tianhuan depression. The reservoir rocks in the oil field within the nose or domal structures consist dominantly of the Jurassic Yan'an Formation, representing a succession of the fluvial-swamp terrigenous clastic coal-bearing formations. Now the oil field is in the later stages of development. The present paper deals with the division of the permeable units made by using the reservoir flow layer indicator (FZI) values, and the relationship between the genetic sandstones and the permeable units and the distribution of the residual oil so as to precisely evaluate the interformational residual oil potential and to ascertain the distribution of lower-grade nonhomogeneous reservoir units.

Key words: permeable unit; residual oil distribution; Fanjiachuan Oil Field; northern Shaanxi