

文章编号: 0253-2697(2007)02-0102-03

非均质油藏的岩石渗透率合成方法研究

赵 军¹ 惠延安² 王 平² 郑新华²

(1. 西南石油大学石油工程学院 四川成都 610500; 2. 中国石油塔里木油田公司 新疆库尔勒 841000)

摘要: 渗透率合成方法经常应用在石油储量计算、油田开发方案编制和油藏数值模拟等油藏工程研究中,主要包括垂向上不同层段渗透率的合成以及沿渗流方向不同渗透率带渗透率的合成。根据达西定律及建立的渗流模型,经过数学推导,得到垂向和水平方向两类渗流模型的渗透率合成公式。其中,垂向上不同层段渗透率的合成按流量叠加原理进行推导,而沿渗流方向不同渗透率带的合成则按不同渗透率带的压差叠加原理进行合成。结合石油地质、开发研究工作的具体情况,用室内实验实测数据进行了验证,计算结果的误差为 0.28 % ~ 5.35 %,基本上在允许的范围之内。

关键词: 非均质油藏; 渗透率; 油藏工程; 渗透率合成方法; 渗流模型

中图分类号: TE319

文献标识码: A

Permeability synthesis method for heterogeneous reservoirs

Zhao Jun¹ Hui Yan'an² Wang Ping² Zheng Xinhua²

(1. Faculty of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China)

Abstract: The permeability synthesis method is often used in reservoir-engineering researches such as calculating oil reserve, making oilfield development plan and numerically simulating reservoir, and includes permeability syntheses of different vertical formations and different permeable zone along with the fluids conducting directions. On the basis of the Darcy's law and the established seepage flow model, two composite formulas of permeability were derived with mathematic calculation. The composite formula of permeability in vertically different strata was obtained according to the flow superposition theory. Adding up all pressure drops derived the composite formula for different permeable zone. According to the petroleum geology and exploitation, the examination of actual data obtained in laboratory experiment was made. The calculated error of the new formula is in the range of 0.28 % to 5.35 %, which is basically within the permissible error range.

Key words: heterogeneous reservoir; permeability; reservoir engineering; permeability synthesis; seepage flow model

对于不同的沉积相储层,其储层参数的分布规律也不同。因此,在石油地质储量计算、油田开发方案编制和油藏数值模拟等油藏工程研究中,经常会遇到垂向上不同层段渗透率合成以及沿渗流方向不同渗透率带渗透率合成的问题^[1]。通常做法是,对于垂向上不同层段平均渗透率合成,采取厚度加权平均法;对于沿渗流方向不同渗透率带渗透率合成则很少报道^[2-3]。笔者推导了垂向上不同层段渗透率合成以及沿渗流方向不同渗透率带渗透率合成的计算公式,并用实验的方法验证了沿渗流方向不同渗透率带渗透率合成公式的科学性和实用性。

1 油藏渗透率的合成

对于油藏岩石渗透率合成,应该考虑油藏岩石沉

积三维空间渗透率的合成^[4]。图 1 给出某一沉积单元体三维空间示意图。

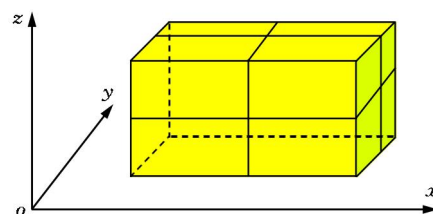


图 1 某一沉积单元体三维空间示意图

Fig. 1 3D schematic showing of a deposition unit

1.1 不同层段垂向上渗透率的合成

首先建立垂向上不同层段渗透率合成的物理模型。假设某油藏有 n 层组成,其总厚度为 H ,合成渗透率(平均渗透率)为 K_z ,各层的渗透率和有效厚度分

基金项目:国家“十五”重点科技攻关项目(2001BA605A02-02-05-03)“深层高温高压凝析气藏储层压力敏感性试验与试井方法研究”部分成果。

作者简介:赵 军,男,1970 年 10 月生,1998 年获西南石油学院工学博士学位,现为西南石油大学副教授,主要从事岩石物理及地质、测井资料综合应用研究。E-mail: zhaojun_70@126.com

别为 $K_1, H_1, K_2, H_2, K_3, H_3, \dots, K_n, H_n$, 相应各层的流体渗流流量为 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, 流体粘度为 μ , 渗透压降为 p 。相应各地层模型的有效长度为 L , 横截面积为 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 。垂向上不同层段渗透率合成的物理模型及参数见图2。

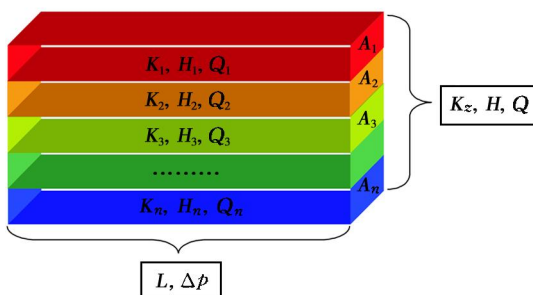


图2 不同层段垂向上渗透率合成物理模型

Fig.2 Physical pattern and parameters of permeability synthesis in vertically different strata

根据达西公式:

$$Q = \frac{KA}{L\mu} p \quad (1)$$

由图1可知

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (2)$$

$$\text{即 } \frac{K_z A}{L\mu} p = \frac{K_1 A_1}{L\mu} p_1 + \frac{K_2 A_2}{L\mu} p_2 + \frac{K_3 A_3}{L\mu} p_3 + \dots + \frac{K_n A_n}{L\mu} p_n \quad (3)$$

由于油藏处于同一油水系统, 因而有

$$\frac{p}{L\mu} = \frac{p_1}{L\mu} = \frac{p_2}{L\mu} = \frac{p_3}{L\mu} = \dots = \frac{p_n}{L\mu} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知

$$K_z A = K_1 A_1 + K_2 A_2 + K_3 A_3 + \dots + K_n A_n \quad (5)$$

即

$$K_z L H = K_1 L H_1 + K_2 L H_2 + K_3 L H_3 + \dots + K_n L H_n$$

$$K_z = \sum_{i=1}^n \frac{H_i K_i}{H} \quad (6)$$

式(6)即为渗透率合成公式, 与文献中提供的计算方法^[5]一致。

1.2 沿渗流 x 方向不同渗透率带的渗透率合成

沿渗流 x 方向不同渗透率带的渗透率合成的物理模型及参数如图3。假设某油藏沿渗流方向有 n 段不同渗透率的储层组成, 其总长度为 L , 总的渗流压降为 p , 总流体流量为 Q , 流体粘度为 μ , 合成渗透率(平均渗透率)为 K_x , 各渗透率带的渗透率、有效长度、流体流量及流体粘度分别为: $K_1, L_1, Q_1, \mu_1; K_2, L_2, Q_2, \mu_2; K_3, L_3, Q_3, \mu_3; \dots; K_n, L_n, Q_n, \mu_n$ 。相应各渗透率带的渗流压降为 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 。

根据式(1)得

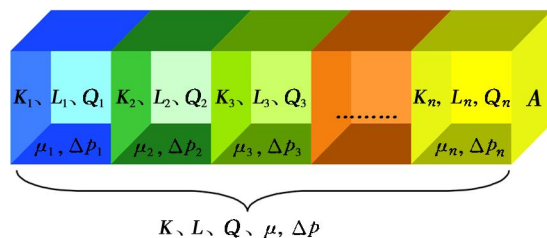


图3 沿渗流方向不同渗透率的渗透率合成物理模型及参数

Fig.3 Physical pattern and parameters of permeability synthesis in the different permeable zones along with percolation direction

$$p = \frac{Q\mu L}{KA} \quad (7)$$

由图2可知

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n \quad (8)$$

$$\text{即 } \frac{Q\mu L}{K_x A} = \frac{Q_1 \mu_1 L_1}{K_1 A} + \frac{Q_2 \mu_2 L_2}{K_2 A} + \frac{Q_3 \mu_3 L_3}{K_3 A} + \dots + \frac{Q_n \mu_n L_n}{K_n A} \quad (9)$$

油藏处于同一油水系统, 因而有

$$Q\mu = Q_1 \mu_1 = Q_2 \mu_2 = Q_3 \mu_3 = \dots = Q_n \mu_n \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知

$$\frac{L}{K_x} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} + \dots + \frac{L_n}{K_n}$$

即

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \quad (11)$$

其中

1.3 沿渗流 y 方向不同渗透率带的渗透率合成

根据以上合成方法的原理, 同样可以得出沿渗流 y 方向不同渗透率带渗透率合成的公式为

$$K_y = L \left[\sum_{j=1}^n \frac{L_j}{K_j} \right]^{-1} \quad (12)$$

2 实验结果验证及误差分析

对8组高、中、低渗透岩样进行了验证实验, 实验结果见表1。用本文推导的合成公式计算出的合成渗透率1与实测平均渗透率的相对误差为0.28%~5.35%, 基本在实验测定允许误差5%以内。如果参照传统的垂向上不同层段渗透率的平均方法(厚度加权平均), 用长度的加权平均值代表合成渗透率^[6-8], 计算出的合成渗透率2与实测平均渗透率的相对误差为3.66%~21.71%, 远大于用本文推荐的合成方法计算的相对误差。因此, 对于沿渗流方向不同渗透率带的渗透率合成, 本文推导的合成公式(11)具有科学性和推广性。

表 1 沿渗流方向不同渗透率带渗透率合成实验验证结果

Table 1 Experimental data of permeability synthesis in the different permeable zones along with percolation direction

样品编号	样品长度/ cm	渗透率/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	平均渗透率 实测值/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	合成渗透率 1 计算值/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	相对误差 1/ %	合成渗透率 2 计算值/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	相对误差 2/ %
f1	f1-1	3.84	898.2				
	f1-2	3.21	1814	1342	1300	3.12	1458
	f1-3	2.87	1810				8.68
f2	f2-1	3.66	742.1				
	f2-2	3.31	2141	1306	1248	4.44	1576
	f2-3	3.07	1960				20.65
f3	f3-1	3.98	99.33				
	f3-2	3.22	186.8	141.8	135.9	4.14	148.1
	f3-3	2.73	173.6				4.44
f4	f4-1	4.03	73.92				
	f4-2	3.39	194.1	110.6	110.3	0.28	134.6
	f4-3	1.67	160.4				21.71
fa	fa-1	4.22	9.15				
	fa-2	3.13	18.98	13.69	13.13	5.35	14.65
	fa-3	2.57	18.43				7.04
fb	fb-1	3.78	9.874				
	fb-2	3.08	21.2	14.73	14.31	2.87	16.19
	fb-3	2.69	19.34				9.91
fc	fc-1	3.76	0.7411				
	fc-2	3.38	2.207	1.268	1.217	4.04	1.533
	fc-3	2.83	1.779				20.89
fd	fd-1	4.12	1.053				
	fd-2	3.2	1.852	1.478	1.416	4.2	1.532
	fd-3	2.68	1.89				3.66

3 结 论

(1) 提出了油藏沉积三维空间渗透率合成的概念,推导了垂向上不同层段渗透率和沿渗流方向不同渗透率带合成渗透率的 3 个公式,实验结果也证明这些公式具有科学性和可推广性,可用于石油地质储量计算、油田开发方案编制和油藏数值模拟等油藏工程研究。

(2) 垂向上不同层段的合成渗透率为各层段厚度和渗透率的函数,其数值等于各层段渗透率的厚度加权平均值。沿渗流的 x 、 y 方向不同渗透率带渗透率的合成渗透率为各渗透率带长度和渗透率的函数,其合成渗透率的倒数等于各渗透率带渗透率的倒数的长度加权平均值。

参 考 文 献

- [1] 信荃麟,张一伟.油藏描述与油藏模型[M].东营:石油大学出版社,1989:154-158.
Xin Quanlin, Zhang Yiwei. Reservoir description and reservoir models[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1989: 154-158.
- [2] 杨通佑,范尚炯,陈元千,等.石油及天然气储量计算方法[M].北京:石油工业出版社,1990:108-114.
Yang Tongyou, Fan Shangjiong, Chen Yuanqian, et al. Oil & natural gas reserves calculation methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 108-114.

- [3] 沈平平.油层物理实验技术[M].北京:石油工业出版社,1998:39-45.
Shen Pingping. Reservoir physics laboratory technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 39-45.
- [4] 谷建伟.基于微观渗流机理的宏观油藏数值模拟研究[J].石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):77-85.
Gu Jianwei. Macroscopic numerical reservoir simulation based on microscopic percolation mechanism[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2006, 30(1): 77-85.
- [5] 刘月田,郭分乔,涂彬,等.全岩心非均匀径向渗流各向异性渗透率测定方法[J].石油学报,2005,26(6):66-68.
Liu Yuetian, Guo Fenqiao, Tu Bin, et al. Measuring method for anisotropic permeability by non-uniform radial flow in a whole core[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 66-68.
- [6] 丁云宏,陈作,曾斌,等.渗透率各向异性的低渗透油藏开发井网研究[J].石油学报,2002,23(2):64-67.
Ding Yunhong, Chen Zuo, Zeng Bin, et al. The development well-pattern of low and anisotropic permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 64-67.
- [7] 周涌沂,王端平,马洋光,等.渗透率的矢量性研究[J].新疆石油地质,2004,25(6):683-685.
Zhou Yongyi, Wang Duanping, Ma Panguang, et al. On vector property of permeability[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(6): 683-685.
- [8] Danilo B, Gerard M. Horizontal permeability anisotropy characterization by pressure transient testing and geological data[J]. SPE 24667, 1992: 1124-1131.

(收稿日期 2006-03-27 改回日期 2006-06-07 编辑 孟伟铭)