

缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟技术与应用

康志江,赵艳艳,张允,吕铁,张冬丽,崔书岳

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间类型多样,溶孔、裂缝、溶洞共存,尺度差异大,流动复杂,既有渗流、裂缝流,又有洞穴流,常用的数值模拟方法已不适用此类复杂介质中的流动问题,为了研究此类油藏的开发机理和剩余油分布规律,建立了缝洞型油藏洞穴流与裂缝流和渗流耦合的数学模型,并用有限体积法对数学模型进行了离散,用自适应对方程组进行了求解,形成了缝洞型油藏的数值模拟软件。对塔河油田一个井组剖面和一个缝洞单元进行了数值模拟历史拟合,揭示了此类油藏剩余油类型主要有洞顶剩余油、边角剩余油、阁楼油、底层剩余油、绕流油和充填溶洞剩余油,结果与生产实际相符,证明缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟模型是正确的,对缝洞型碳酸盐岩油藏剩余油挖潜和提高采收率有较大的应用价值。

关键词:数学模型;数值求解;剩余油分布;缝洞型碳酸盐岩油藏;塔河油田

中图分类号:TE319 **文献标识码:**A

Numerical simulation technology and its application to fractured-vuggy carbonate reservoirs

Kang Zhi Jiang, Zhao Yanyan, Zhang Yun, Lü Tie, Zhang Dongli, Cui Shuyue

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Fractured-vuggy carbonate reservoirs have various types of reservoir space with significantly different sizes including vugs, fractures, and caverns. Fluid flow in this type of reservoirs is complicated by the coexistence of flow through the dissolved pores, flow in the fractures and flow in the caverns. The common numerical simulators are no longer suitable for fluid flow in this complex medium. In order to study the development mechanics and the remaining oil distribution in the reservoir, a mathematical model that couples cavern flow and fracture flow with seepage flow is established and discretized with the finite volume method. The equations are solved by using the self-adaptation method. A numerical simulation software for the fractured-vuggy reservoir is developed. The flows within a well group and a fractured-vuggy unit in Tahe oilfield were simulated respectively. The results show that the remaining oil in this kind of reservoirs mainly include the remaining oil at the top of caverns, marginal remaining oil, attic oil, the remaining oil at the bottom of caverns, the remaining oil around high permeable channel and the remaining oil in filled caverns. The results are consistent with the actual production data, verifying effectiveness of the fractured-vuggy carbonate reservoir numerical simulation model. This model is useful for extracting remaining oil and enhanced oil recovery for fractured-vuggy carbonate reservoirs.

Key words: mathematical model, numerical solution, remaining oil distribution, fractured-vuggy carbonate reservoir, Tahe oilfield

孔隙型介质的数值模拟模型与方法已经比较成熟^[1]。20世纪60年代,Warren-Root提出了双重介质数值模拟方法^[2],后来Barenblatt和Kazemi等人又做了进一步改进^[3-6]。1975年Clossman在双重介质基础上建立了孔、缝、洞三重介质达西渗流模型^[7];葛家理在1985年建立了多重介质高速非达西渗流数学模型^[8];吴玉树、康志江、邸元等人应用连续介质渗流理

论建立了缝洞型油藏多相流问题的数值模拟方法^[9-10]。刘学利等建立了Darcy-Stokes模型,应用于数值试井^[11]。目前常用的商用数值模拟软件如ECLISPE, CMG, VIP, Athos和Sure等解决的均是渗流问题。

缝洞型油藏储集体类型多样,不仅存在微孔隙、微裂缝、裂缝和中型溶洞,而且存在大型溶洞、大型裂缝,

收稿日期:2014-10-15;修订日期:2014-11-02。

第一作者简介:康志江(1969—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail: kangzj. syky@ sinopec. com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB202404)。

尺度差异大,空间结构复杂;流体流动类型复杂,不仅有渗流,还有裂缝流和洞穴流^[12-15]。目前的商业软件不适用于此类复杂介质中的复杂流动问题,因此需要创建适用于缝洞型油藏的数值模拟方法。作者依据缝洞型油藏的地质特征和流动特征,建立了溶洞流、裂缝流与渗流耦合的油水两相数学模拟模型和求解方法,研制了缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟软件,对塔河油田井组剖面和缝洞单元进行了数值模拟历史拟合。对缝洞型油藏的高效开发和剩余油挖潜有非常重要的作用。

1 缝洞型油藏数学模型

缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型多样,既有大型溶洞、大裂缝、小溶洞、小裂缝、溶蚀孔洞与微裂缝,流体流动既有洞穴流动也有渗流。针对这种复杂介质中流体流动问题,建立了缝洞型油藏中油水两相流体流动数学模型。

假设条件:①油和水为微可压缩的不混溶牛顿流体;②流体流动为等温条件。

1.1 连续性方程

根据质量守恒定律,得到油水两相在溶洞、裂缝中的连续性方程为:

$$\frac{\partial(S_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i) = 0, \quad i = \text{油, 水} \quad (1)$$

溶孔中的连续性方程为:

$$\frac{\partial(\phi S_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i) = 0, \quad i = \text{油, 水} \quad (2)$$

式中: ρ_i 为流体密度,kg/m³; v_i 为流体速度,m/s; S_i 为含油饱和度,%; t 为时间,s; ϕ 为孔隙度,%;

1.2 运动方程

1) 油水两相在大溶洞和大裂缝的运动属于自由流动,遵循 Navier - Stokes 定律,在微裂缝和溶孔中的运动属于渗流,遵循达西定律。在整个油藏中,既有自由流动又有渗流,为了耦合溶洞与多孔介质间的界面问题,把多孔介质中的运动方程作为源项。在未充填溶洞中还存在油水界面追踪问题,结合 VOF 方法,运动方程可以写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i v_i) \\ & = -\nabla p_i + \mu_i \nabla^2 v_i + \frac{1}{3} \mu_i \nabla(\nabla v_i) + \\ & \rho_i g + f_\delta - \left(\frac{\mu_i}{K} + \frac{\alpha \rho_i}{2} |v_i| \right) v_i, \quad i = \text{油, 水} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: α 为惯性阻力系数; p_i 为流体压力,MPa; μ_i 为流

体粘度,mPa·s; g 为重力加速度,m/s²; f_δ 为表面张力,N/m; K 为渗透率,10⁻³ μm²; ρ_i 为流体密度,kg/m³; v_i 为流体速度,m/s。

2) 溶孔和微裂缝中油水两相流的运动方程遵循达西定律^[17],即

$$v_{pi} = - \frac{KK_{ri}}{\mu_i} (\nabla p_i - \rho_i g \nabla Z), \quad i = \text{油, 水} \quad (4)$$

当雷诺数达到一定值(0.2~0.3)后,达西定律不再适用。

对于高速非达西流,惯性损失增大,运动方程为:

$$-(\nabla p_i - \rho_i g) = \frac{\mu_i}{KK_{ri}} v_{pi} + \beta_i \rho_i v_{pi} |v_{pi}|, \quad i = \text{油, 水} \quad (5)$$

式中: Z 为笛卡尔坐标系中 Z 方向的距离,m; β_i 为非达西流系数; K_{ri} 为相对渗透率。

1.3 状态方程

状态方程包括流体压缩系数和岩石压缩系数。流体压缩系数是指等温条件下体积相对变化率与压力变化的比值。岩石压缩系数是指等温条件下单位体积岩石中孔隙体积随压力的变化值^[16]。

$$\text{流体压缩系数 } C_i = \frac{1}{\rho_i} \frac{d\rho_i}{dp_i}, \quad i = \text{油, 水} \quad (6)$$

$$\text{岩石压缩系数 } C_\phi = \frac{1}{V_p} \frac{dV_p}{dp} = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dp} \quad (7)$$

在多孔介质区既要考虑流体压缩性,也要考虑岩石压缩性,用综合压缩系数 C_t 来表示:

$$\begin{aligned} C_t &= C_\phi + \phi C_i \\ &= C_\phi + \phi(C_o S_o + C_w S_w) \end{aligned} \quad (8)$$

1.4 饱和度约束方程

$$S_w + S_o = 1 \quad (9)$$

1.5 毛管力方程

在溶孔和微裂缝中必须考虑毛管力。

$$p_{cow} = p_o - p_w \quad (10)$$

式中: p_i 为流体压力,MPa; p_c 为毛管压力,MPa。

2 数值解法

针对缝洞型油藏三维两相微可压缩流体数值模拟计算,首次提出了洞穴流、裂缝流与渗流耦合型联立求解的方法,应用有限体积离散,控制体为多面体,整个网格为任意的非结构网格。以分离的方法处理偏微分方程组,即一次求解其中的一个方程,以显式的方法处

理方程间的耦合。

迭代求解方程组选择自适应隐式求解,综合了全隐式和IMPES两种算法的优点。对于井点单元和非均质较强的单元,采用全隐式算法进行计算;对于非均质较弱的单元,采用IMPES算法进行计算,使计算速度和精度大大提高。

3 缝洞型油藏数值模拟技术应用

3.1 井组剖面数值模拟

根据缝洞型油藏野外露头 and 地质建模结果^[17-18],建立了5个剖面模型,2个剖面模型有2口采油井,3个剖面模型是一注一采,对其进行了数值模拟,模拟结果可以直观地认识缝洞型油藏的剩余油分布。

给定井底流压 40 MPa,注水井恒定注入速度,注

水速度为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$,总模拟时间 500 d,模拟结果见图1。由模拟结果可看出,剩余油主要分布在溶洞顶部、阁楼、边角、高导流通道屏蔽的地方和充填溶洞中。边角剩余油的形成主要是边界的驱动力不足,在油藏边部留下了大量的剩余油;在未井控的缝洞储集体高处形成了阁楼油;由于洞体的天然不规则形状及底水驱,形成了洞顶剩余油;在底水不充足地区,注采后底层缝洞储集体存在剩余油;注水后在高渗透区形成快速主流通路,在通道边部形成了绕流剩余油;由于充填溶洞水驱动用较小,在充填溶洞中形成了一定数量的剩余油。

3.2 塔河油田某缝洞单元数值模拟

3.2.1 数值模拟历史拟合

塔河油田某缝洞单元位于构造斜坡轴部,含油层为奥陶系一间房组和鹰山组,奥陶系顶面整体呈北东

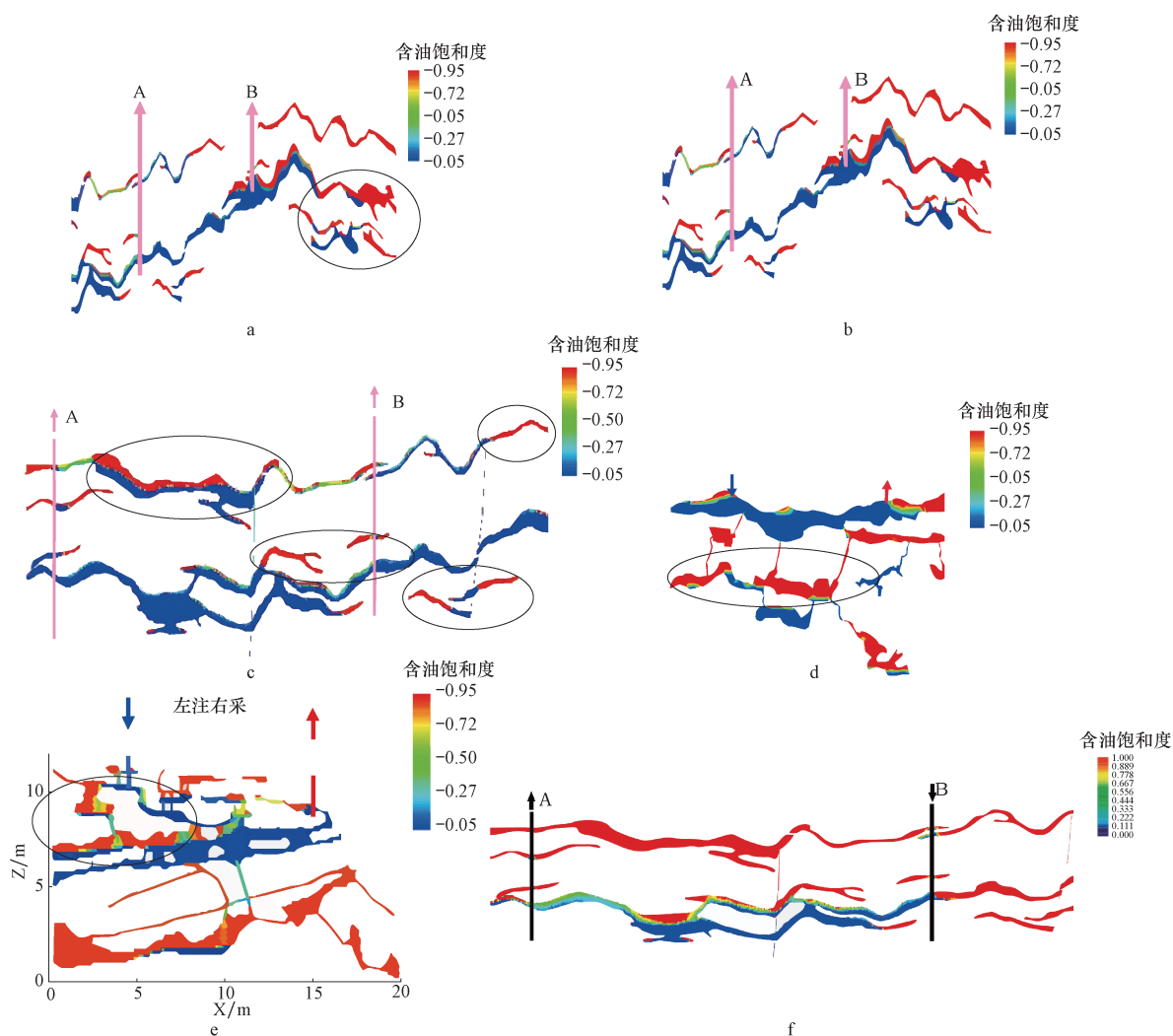


图1 不同类型剩余油分布

Fig. 1 Distribution of different types of residual oil

a. 边角剩余油; b. 阁楼油; c. 洞顶油; d. 底层剩余油; e. 绕流油; f. 充填溶洞剩余油

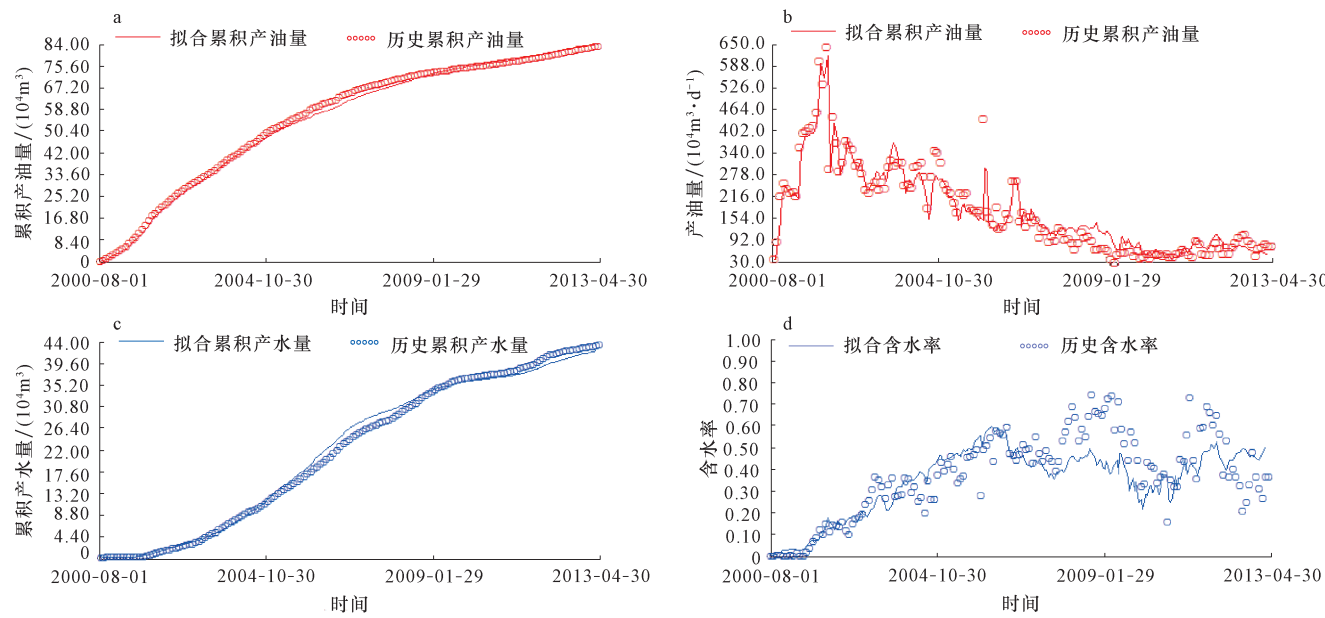


图2 单元生产历史拟合

Fig. 2 Unit production history matching chart

a. 累积产油量; b. 日产油量; c. 累积产水量; d. 含水率

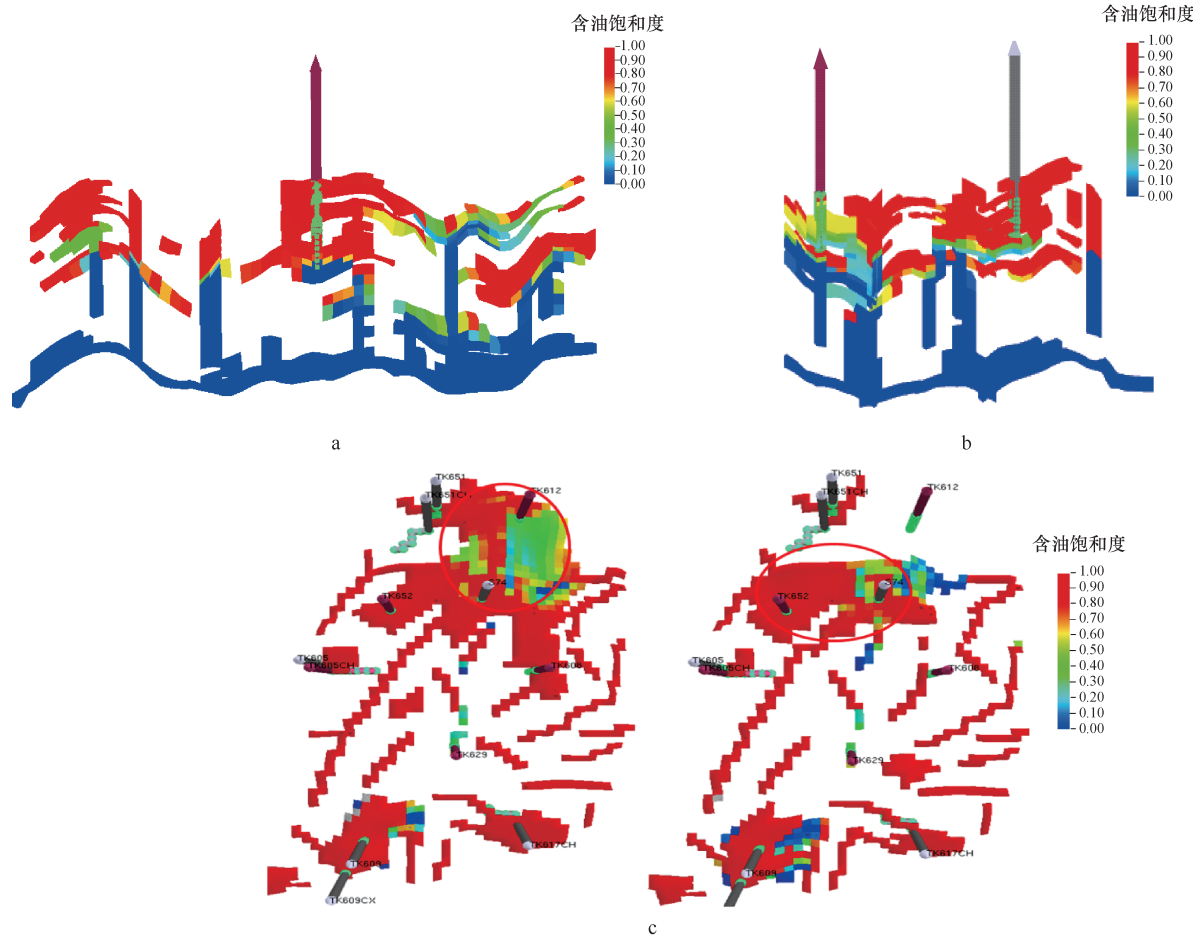


图3 缝洞单元剩余油分布

Fig. 3 Remaining oil distribution of fractured-vuggy units

a. 洞顶剩余油; b. 高导流通道屏蔽剩余油; c. 井间剩余油

表 1 不同类型储集体剩余地质储量统计
Table 1 Statistics of remaining geological reserves of different types of reservoirs

储集体 类型	原始地质储量		剩余地质储量		采出量		采出 程度/%
	储量/(10 ⁴ m ³)	所占比例/%	储量/(10 ⁴ m ³)	所占比例/%	储量/(10 ⁴ m ³)	所占比例/%	
基质	13. 62	2. 65	10. 53	2. 41	3. 09	4. 02	22. 69
垮塌充填洞	117. 86	22. 96	95. 85	21. 96	22. 01	28. 66	18. 67
砂泥充填洞	39. 92	7. 78	35. 05	8. 03	4. 87	6. 34	12. 20
溶蚀孔	149. 92	29. 20	130. 47	29. 89	19. 45	25. 32	12. 98
溶蚀缝	54. 94	10. 70	48. 51	11. 11	6. 42	8. 36	11. 69
未充填洞	118. 41	23. 07	101. 97	23. 36	16. 44	21. 40	13. 88
致密段	0	0	0	0	0	0	0
大尺度裂缝	18. 68	3. 64	14. 15	3. 24	4. 53	5. 90	24. 25
合计	513. 35	100. 00	436. 53	100. 00	76. 81	100. 00	14. 96

南西向倾斜,具有东北部高,南西部低的趋势,经历了多次构造运动,断裂发育,下奥陶统碳酸盐岩经历了不同程度的风化、溶蚀,形成了非均质性极强的岩溶构造特征,单元内溶洞比较发育,主要沿断裂发育,溶洞类型主要以未充填和垮塌填充洞为主,形成以断裂控制为主的岩溶储层。储集空间主要有大型溶洞、不同尺度裂缝和溶蚀孔洞。

油藏平均深度为 5 500 m,含油面积为 4. 0 km²,石油地质储量为 481. 5 × 10⁴ t,标定采收率 25. 6%,可采储量 123. 1 × 10⁴ t。2000 年 8 月投产,截止到 2013 年 3 月,共投产油井 12 口,转注 1 口,累计产油 86. 6 × 10⁴ t,累计产水 45. 0 × 10⁴ m³,采出程度 18%。目前单元日产油 125. 6 t,日产水 47. 5 m³,含水率 27%,平均单井日产油量 17. 9 t,平均单井日产水量 6. 8 m³。注水井定注入速度注水,油井定液生产,拟合油井和单元的油产量和含水率,对该单元的开发历史进行了历史拟合,结果见图 2。

3. 2. 2 剩余油分布规律

缝洞型油藏剩余油类型由两种主要的影响因素决定:一是储集体类型;二是井与储集体、储集体与储集体的匹配关系。由于井与溶洞、裂缝与溶洞匹配关系差,底水(注水)无法有效驱替,在洞顶形成了剩余油;由于井间极强的平面非均质性,使压力不能有效波及,形成了井间剩余油;由于水沿沟通底水的高角度裂缝和注采井间水平裂缝水窜,形成了高导流屏蔽剩余油(图 3)。

对不同类型储集体剩余油地质储量进行了统计(表 1)。剩余油主要分布在垮塌充填溶洞、未充填溶洞和溶蚀孔中。

3. 2. 3 剩余油挖潜建议

针对不同类型剩余油,调整对策为:洞顶剩余油通

过注气、侧钻井挖潜;井间剩余油通过注水优化、上返挖潜;高导流通道屏蔽剩余油通过注水优化和上返挖潜;边角剩余油可通过侧钻井、新钻井挖潜。

4 结论

针对缝洞型油藏的地质特征和流动特征,建立了洞穴流与裂缝流、渗流耦合的数学模型,研制了缝洞型油藏数值模拟软件。应用实例表明,缝洞型油藏数值模拟模型正确,方法合理,对缝洞型碳酸盐岩油藏的剩余油挖潜和提高采收率有较大的实用价值。

参 考 文 献

[1] Aziz K, Settari A. 油藏数值模拟[M]. 袁士义,王家禄,译. 北京:石油工业出版社,2004:7-31.
Aziz K, Settari A. Reservoir numerical simulation[M]. Yuan Shiyi, Wang Jialu, translation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 7-31.

[2] Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs, Trans[J]. SPE of AIME, 1963, 3(3): 245-255.

[3] Barenblatt G I, Entov V M, Ryzhink V M. Theory of fluid flows through natural rocks[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 10-30.

[4] Barenblatt G I, Zheltov Iu P, Kochina I N. Basic concept in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. Applied mathematics and mechanics, 1960, 24: 1286-1303.

[5] Kazemi H, Atan S, Al-Matrook M, et al. Multilevel fracture network modeling of naturally fractured reservoirs[J]. SPE 93053, 2005.

[6] Kazemi H, Merrill L, Porterfield K, et al. Numerical simulation of water oil flow in naturally fractured reservoirs[J]. SPE 5719, 1976.

[7] Closemann P J. The aquifer model for fissured fractured reservoir [J]. SPE 1975, 385-398.

[8] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 215-244.
Ge Jiali. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 215-244.

- [9] Kang Z J, Wu Y S. Modeling multiphase flow in naturally fractured vuggy petroleum reservoirs [C]//The 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, U. S. A; SPE 102356, 2006; 1-10.
- [10] Wu Y S, Di Y, Kang Z J, et al. A multiple-continuum model for simulating single-phase and multiphase flow in naturally fractured vuggy reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 13-22.
- [11] 刘学利, 彭小龙, 杜志敏, 等. 油水两相流 Darcy-Stokes 模型 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6): 89-92.
Liu Xueli, Peng Xiaolong, Du Zhimin, et al. Oil water two phase flow darcy-stokes mode [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(6): 89-92.
- [12] 杨坚, 程倩, 李江龙, 等. 塔里木盆地塔河 4 区缝洞型油藏井间连通程度 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 484-489.
Yang Jian, Cheng Qian, Li Jiang tong, et al. Interwell-connectivity analysis for fracture-vug reservoirs in the block-4 of Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 484-489.
- [13] 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 634-640.
Kang Zhijiang, Li Jianglong, Zhang Dongli, et al. Percolation characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 634-640.
- [14] 康志江, 赵艳艳, 张冬丽, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟基础理论与应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(5): 68-71.
Kang Zhijiang, Zhao Yanyan, Zhang Dongli, et al. Basic theory and application of numerical simulation in fractured-vuggy carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology and exploitation in Daqing, 2011, 30(5): 68-71.
- [15] 李宗宇. 塔河奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 856-862.
Li Zongyu. A discussion on development strategies for the Ordovician fractured-vuggy carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 856-862.
- [16] 韩大匡, 陈钦雷, 闫存章. 油藏数值模拟基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 1-120.
Han Dakuang, Chen Qinlei, Yan Cunzhang. The basis for reservoir numerical simulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 1-120.
- [17] 康志江, 崔书岳. 塔河油田缝洞型油藏剩余油分布特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(6): 54-58.
Kang Zhijiang, Cui Shuyue. Distribution characteristics of the remained oil in tahe fractured-cave carbonate oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and exploitation in Daqing, 2012, 31(6): 54-58.
- [18] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法——以塔河油田四区奥陶系油藏为例 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.
Hu Xiangyang, Li Yang, Quan Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 383-387.

(编辑 张亚雄)

(上接第 924 页)

- [18] Dupont Nivet. Discordant paleomagnetic direction in Miocene rocks from the central Tarim Basin; evidence for local deformation and inclination shallowing [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 199(3-4): 473-482.
- [19] 张波, 张仲培, 郑亚东, 等. 膝褶皱带构造及其地球物理正演 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 105-115.
Zhang Bo, Zhang Zhongpei, Zheng Yadong, et al. Kink-band structure and its geophysical forward modeling [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(1): 105-115.
- [20] Argon A S. Treatise on materials science and technology [M]. New York: Academic Press, 1972: 79-114.
- [21] Budiansky B. Micromechanics [J]. Compute Structures, 1983, 16(1): 3-12.
- [22] Ardell A J, Christie J M, Tullis J. Dislocation substructures in deformed quartz rocks [J]. Crystal Lattice Defects, 1973, 4: 275-285.
- [23] Anderson T B. Kink-bands and related geological structures [J]. Nature, 1966, 210: 1249-1251.
- [24] Nishikawa O, Takeshita T. Dynamic analysis and two types of kink bands in quartz veins deformed under subgreenschist conditions [J]. Tectonophysics, 1999, 301(1-2): 21-34.
- [25] Kirschner D L, Teixell A. Three-dimensional geometry of kink bands in slates and its relationship with finite strain [J]. Tectonophysics, 1996, 262(1-4): 195-211.
- [26] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology (Volume 1: Strain Analysis) [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [27] 张波, 李生福, 张进江, 等. 膝褶、膝褶带、共轭膝褶带: 一种可能的新型油气构造样式 [J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 32-40.
Zhang Bo, Li Shengfu, Zhang Jinjiang, et al. Kink, kink-band and conjugate kink-band: a probably potential new type of structural trap [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 32-40.

(编辑 张玉银)