

孔喉尺度弹性调驱微球与储层匹配关系理论研究

贾晓飞¹, 雷光伦², 尹金焕³, 姚传进², 吴 川², 李文忠²

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266555; 3. 天津市特变电工变压器有限公司, 天津 300308)

摘 要: 储层的非均质性和高含水后期的孔隙结构变化是导致注水低效、无效循环的根本原因。通过分析油藏渗流规律, 利用注采井组之间的调配见效时间定量描述了高含水开发后期强吸水层段的孔隙结构变化特征。根据储层喉道直径的分布特点, 运用威布尔分布函数建立了与油藏初始状态匹配的微球直径计算模型, 分别从开发后期水驱冲刷作用引起的孔喉结构变化和储层非均质性两个方面对微球直径计算模型进行了修正, 得到了储层条件下弹性微球的直径范围; 考虑微球吸水膨胀特性, 最终得到了与高含水后期储层条件匹配的合成弹性微球的直径范围。建立的调驱弹性微球直径与储层物性参数、油水井日常生产参数及微球膨胀倍数间的匹配关系, 为调驱设计时确定弹性微球直径提供了理论依据。

关键词: 孔喉尺度 弹性微球 剖面调整 孔隙大小 膨胀

中图分类号: TE357. 9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)04-0087-03

The Relationship between Pore-Scale Elastic Microsphere and Formation Matching

Jia Xiaofei¹, Lei Guanglun², Yin Jinhuan³, Yao Chuanjin², Wu Chuan², Li Wenzhong²

(1. Tianjin Branch, CNOOC Ltd., Tianjin, 300452, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555, China; 3. Tianjin Special Variable Electrical Transformer Co. Ltd., Tianjin, 300308, China)

Abstract: Formation heterogeneity and pore structure change after waterflooding are the main reasons for low water injection efficiency and water cycling. By analyzing reservoir seepage law, pore structure change at high water-injected layer in later development stage was quantitatively described using the effective adjustment time between production and injection wells. On the basis of pore diameter distribution of microsphere, a model for microspheres diameter which matches the original reservoir condition was developed using Weibull distribution function. The model is modified considering the pore structure change after long time waterflooding and formation heterogeneity. The diameter range of microsphere in reservoir condition is obtained. Taking microsphere water-swelling property into account, diameter range of the microsphere which matches the post-reservoir formation condition was obtained. The correlation between diameter of microsphere and reservoir parameters, daily production data and microsphere water-swelling was created. All these provided a theoretical basis for determination microsphere diameter in designing microsphere profile modification scheme.

Key words: pore scale; elastic microsphere; profile control; pore size; expansion

油藏具有多油层多韵律性特征, 存在层间和层内非均质性、高渗区域和条带等, 经过长期水驱冲刷作用, 储层的孔喉结构发生了很大变化, 优势渗流通道形成并不断发展。对该类储层进行深部调剖是解决其注水低效的有效途径。孔喉尺度弹性微球是微米、纳米级固体弹性有形球体, 当其存在于岩石孔隙中时会对水流产生阻力或封堵水流通通道。数量庞大的微球在储层孔隙喉道中具有运移、封堵、弹性变形、再运移、再封堵的全油层运移特征, 从而实现其深部液流转向目的; 同时微球表面的活性亲油基团会吸附岩石表面的油膜, 不断向前携带驱替剩余油。

微球调驱剂的优势在于: 可以根据储层参数在地面合成与之匹配的弹性微球, 避免了交联聚合物在地下不成胶或成胶强度低的问题; 微球耐温、耐矿化度能力强, 封堵强度高, 阻力系数与残余阻力系数大; 微球悬浮分散性能良好, 且不增加注入水黏度, 注入时管线的阻力不增大^[1]。但是, 固体调剖剂必须与储层

收稿日期: 2009-12-13; **改回日期:** 2011-05-31。

作者简介: 贾晓飞(1984—), 男, 山西大同人, 2007年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2010年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位, 目前主要从事油藏工程方面的研究。

联系方式: (022)25804766, xf_jia_xf@163.com。

孔喉直径相匹配时才能具有良好的封堵效果。微球直径太小不能产生有效封堵,微球直径太大则注入困难,难以到达储层深部,且可能伤害油气层。因此,研究孔喉尺度弹性微球与开发后期高含水非均质储层参数的匹配关系,对合理选择微球直径、优化微球调剖方案、达到最佳调剖效果具有重要的指导意义。

1 储层条件下弹性微球直径的确定

1.1 与油藏初始状态匹配的微球直径

对于储层岩石孔喉的描述,目前常用的分布函数有正态分布函数、对数正态分布函数、瑞利分布函数、截断正态分布函数和威布尔分布函数^[2]。笔者采用较有代表性的威布尔分布函数表征喉道直径的分布,其概率密度函数为:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} (x - \delta)^{\alpha-1} \exp[-(x - \delta)^\alpha / \beta] \quad (x \geq \delta) \quad (1)$$

其累计概率分布函数为:

$$\eta = 1 - \exp[-(D - \delta)^\alpha / \beta] + 1 \quad (2)$$

整理式(2)得累计分布与喉道直径之间的关系为:

$$D = [-\beta \ln(1 - \eta)]^{\frac{1}{\alpha}} + \delta \quad (3)$$

微球随注入水进入储层,其运移首先是沿着渗流阻力最小的方向进行,因此其深部液流转向作用主要发生在大的孔隙喉道中,因此选择累计概率70%~75%对应的喉道直径作为与油藏初始状态匹配的微球直径,即:

$$D_1 = D_{70 \sim 75} = [-\beta \ln(1 - \eta)]^{\frac{1}{\alpha}} + \delta \quad (4)$$

式中: f 为威布尔分布概率密度函数; η 为威布尔分布累计概率分布函数; D 为喉道直径, μm ; $D_{70 \sim 75}$ 为累计概率70%~75%对应的喉道直径, μm ; D_1 为与油藏初始状态匹配的微球直径, μm ; δ 为位置参数, $\delta \geq 0$; α 为形状参数, $\alpha > 1$; β 为尺度参数, $\beta > 0$ 。

1.2 开发后期水驱冲刷作用对微球直径的修正

经过长期的注水开发,储层物性及流体性质等均发生了明显变化,油水运动规律、油水动态分布日趋复杂。储集层岩石的孔隙结构是影响油藏储集能力和油气开采的主要因素。油气储集层的微观孔隙结构特征控制流体在岩石孔隙中的流动、渗流特征及驱油效率^[3]。研究表明,经过长期水驱后流体的主要渗流喉道半径增大,对渗流的贡献率增大,水驱前后孔隙半径分布没有明显的变化,储集层控制渗

流特征的主要因素是喉道特征,而不是孔隙特征^[3-4]。而微球调驱的机理就在于对喉道进行有效封堵,压力升至一定压力值后微球发生弹性变形,继续向深部运移,继续对下一个喉道进行封堵。因此,针对高含水开发后期水驱冲刷作用对储层孔隙喉道结构的影响,有必要对微球直径进行修正。

长期水驱会使主要渗流喉道半径增大,假设长期水驱过程为平面径向流,利用注采井组之间的调配见效时间可以描述开发后期强吸水储层的孔喉直径变化规律^[5]。

根据平面径向流公式,利用达西定律,计算单一流体沿某一均质储集层从供给边缘运移到另一口井所需的时间为:

$$t = \frac{\phi \mu \ln \frac{R_e}{R_w}}{2K(p_e - p_w)} (R_e^2 - R_w^2) \quad (5)$$

式中: t 为注水调配油井见效时间,s; ϕ 为孔隙度; R_e, R_w 为供给半径和井筒半径,cm; K 为渗透率, μm^2 ; μ 为注入水黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p_e 和 p_w 分别为供给边缘压力和井底流压, 10^{-1}MPa 。

对特高含水层段,可近似认为只有水相单相流体流动,根据式(5)可计算这一阶段的 K/ϕ ,即:

$$\frac{K}{\phi} = \frac{\mu \ln \frac{R_e}{R_w} (R_e^2 - R_w^2)}{2t(p_e - p_w)} \quad (6)$$

对理想均质岩石(单位面积内有 n 根半径为 r 的毛管),若其渗流阻力与实际岩石的渗流阻力相等,则其喉道直径为:

$$D' = 2\tau \sqrt{8K/\phi} \quad (7)$$

式中: D' 为高含水后期储层喉道的直径, μm ; τ 为迂曲度。

由于微球直径正比于喉道直径,高含水后期与储层岩石孔喉匹配的微球直径满足如下关系。

$$D_2 = \frac{D'}{\bar{d}} D_1 \quad (8)$$

式中: D_2 为高含水后期修正后的微球直径, μm ; \bar{d} 为油藏初始状态的平均喉道直径, μm 。

1.3 储层非均质性对微球直径的修正

开发后期水驱冲刷作用对喉道直径的修正实际上得到的是高含水层段的平均喉道直径。考虑到实际储层的非均质性,特高含水层的最大喉道直径为:

$$D'_{\max} = D' \sqrt{\beta_k} \quad (9)$$

式中: D'_{\max} 为特高含水层的最大喉道直径, μm ; β_k 为储层渗透率非均质系数。

因此,根据实际储层的非均质条件,对与之相匹配的微球直径进行修正,得到储层条件下弹性微球的直径为:

$$D_3 = D_2 \sqrt{\beta_k} \quad (10)$$

式中, D_3 为储层条件下弹性微球的直径, μm 。

2 地面条件下合成微球直径的确定

孔喉尺度弹性微球是由单体在过氧化物引发剂引发下形成的一定链长的单体自由基,自由基再与交联剂发生交联反应,使聚合物链不断地交联缠绕在一起,最终形成分子内交联的具有三维空间网络结构的球形弹性聚合物胶体。这种特殊的网络结构使微球不溶于水,但会吸水膨胀。微球的膨胀倍数以吸水率来表示,指单位质量微球吸收液体的质量,可以通过实验测得^[6]。膨胀倍数受储层温度和储层流体矿化度的影响^[7]。

根据微球的吸水膨胀性能,可以得地面合成微球的直径为:

$$D_s = \frac{D_3}{Q} \quad (11)$$

式中: D_s 为地面条件下合成微球的直径, μm ; Q 为微球的膨胀倍数。

3 实例计算

某区块储层及生产参数为:喉道直径 1.23~49.51 μm ,平均 13.34 μm ;迂曲度为 2;非均质系数为 2;储层温度为 65 $^{\circ}\text{C}$;储层流体矿化度为 5 000 mg/L ;供给半径为 150 m;井筒半径为 0.1 m;生产压差为 8 MPa;地层条件下注入水黏度为 0.3 $\text{mPa} \cdot \text{s}$;注水调配油井见效时间为 10 d。

根据储层参数拟合得到喉道直径分布符合威布尔分布形式,计算得到与油藏初始状态匹配的微球直径为 17~19 μm ;对微球直径进行开发后期长期水驱冲刷作用的修正,修正之后的微球直径为 27~30 μm ;考虑储层非均质性,对微球直径进行修正,得到与之相匹配的储层条件下弹性微球的直径为 38~42 μm 。通过试验测得 65 $^{\circ}\text{C}$ 、流体矿化度为 5 000 mg/L 条件下的微球膨胀倍数为 3。因此,地面条件下合成微球的直径为 12~14 μm 。

4 结 论

1) 长期水流冲刷作用使储层孔隙结构发生变化,主要渗流喉道半径增大,对渗流的贡献增大,而

水驱前后孔隙半径分布没有明显的变化。储集层控制渗流特征的主要因素是喉道特征,而微球调驱的机理就是对渗流喉道进行有效封堵。

2) 利用威布尔分布函数建立的与油藏初始状态匹配的微球直径计算模型,充分考虑了储层的喉道直径分布特征和微球的渗流特性;根据高含水后期储层孔隙结构变化特征及储层非均质特征,对微球直径进行的修正,充分体现了弹性固体微球与开发后期储层的匹配性和适应性。

3) 微球特殊的空间网络结构使其具有良好的吸水膨胀性能,因此可以根据膨胀倍数求得地面条件下合成微球的直径。

4) 计算微球与储层的匹配关系只需要油田常规参数和微球物化参数,方法简单,可实施性强,对矿场实际应用具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 雷光伦,郑家朋. 孔喉尺度聚合物微球的合成及全程调剖驱油新技术研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(1):87-90. Lei Guanglun, Zheng Jiapeng. Composing of pore-scale polymer microsphere and its application in improving oil recovery by profile control[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Nature Science, 2007, 31(1): 87-90.
- [2] Bo Qiliang, Zhong Taixian, Liu Qingjie. Pore scale network modeling of relative permeability in chemical flooding[R]. SPE 84906, 2003.
- [3] 林玉保, 张江, 刘先贵, 等. 喇嘛甸油田高含水后期储集层孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 215-219. Lin Yubao, Zhang Jiang, Liu Xiangui, et al. Pore structure features of reservoirs at late high water-cut stage, Lamadian Oil-field, Daqing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 215-219.
- [4] 张家良, 黄在友, 王贺林, 等. 枣南孔一段油藏强水淹层孔喉半径变化半定量分析和治理对策[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(2): 56-59. Zhang Jialiang, Huang Zaiyou, Wang Helin, et al. Semiquantitative analysis and treatment of pore radii variation in strongly flooded portion of Kong 1 Reservoir, Zaonan Block[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2): 56-59.
- [5] 张家良, 熊英, 丁长新, 等. 开发后期储层孔喉半径变化规律研究及治理对策[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(增刊 1): 123-126. Zhang Jialiang, Xiong Ying, Ding Changxin, et al. Study of variation rule in pore throat radius of reservoir in later development stage and harness counter measures[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(Suppl 1): 123-126.
- [6] 张增丽, 雷光伦, 刘兆年, 等. 聚合物微球调驱研究[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 749-751. Zhang Zengli, Lei Guanglun, Liu Zhaonian, et al. A study on profile modification by polymer microsphere injection[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 749-751.
- [7] 贾晓飞, 雷光伦, 李会荣, 等. 孔喉尺度聚合物弹性微球膨胀性能研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 87-90. Jia Xiaofei, Lei Guanglun, Li Huirong, et al. A study on water-swelling property of pore-scale elastic polymer microsphere [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 87-90.