

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.05.011

束缚水饱和度应力敏感致密气井动态特征研究

窦祥骥¹, 林 恺², 何岩峰¹, 王 相¹, 刘 成¹, 赵虹宇¹

(1.常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213016; 2.中石化胜利油田分公司孤东采油厂 工艺研究所,山东 东营 257000)

摘要:与常规油气藏不同,致密气藏的束缚水饱和度通常不再是一个定值,而是表现为压力的函数。为合理表征束缚水饱和度应力敏感性,并探究其对产水压裂气井动态特征的影响,建立了束缚水饱和度应力敏感条件下的相渗模型,并在此基础上构建致密气藏气-水两相渗流模型,进而探讨了束缚水饱和度应力敏感对相渗曲线、压力响应特征、产量特征等关键指标的影响。研究表明,束缚水饱和度应力敏感会导致压力导数双对数曲线后期向下偏移,同时会对气井稳产时间、水气比等生产指标造成显著的影响。因此,在致密气藏产水压裂气井动态反演、产能预测、合理开发方案制定等过程中,应充分考虑束缚水饱和度应力敏感。

关键词:致密气藏;产水压裂气井;束缚水饱和度;应力敏感;动态特征

中图分类号:TE 9

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)05-0075-06

Study on Dynamic Characteristics of Tight Gas Well with Stress-Sensitive Irreducible Water Saturation

DOU Xiangji¹, LIN Kai², HE Yanfeng¹, WANG Xiang¹, LIU Cheng¹, ZHAO Hongyu¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. GuDong Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Branch of Sinopec, Dongying 257000, China)

Abstract: Different from conventional reservoirs, the irreducible water saturation of tight gas reservoirs is not a fixed value, but a function of pressure. In order to reasonably characterize the stress sensitivity of irreducible water saturation and investigate its influence on the dynamic characteristics of fractured gas wells, a relative permeability model under irreducible water saturation stress-sensitivity condition is established. On this basis, a two-phase seepage model is built, and then the influence of irreducible water saturation stress-sensitivity is discussed. The results show that the stress-sensitivity of irreducible water saturation would lead to the change of the log-log plot for pressure derivative as

收稿日期:2018-04-10。

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB440001);常州大学校启动基金项目(ZMF16020039)。

作者简介:窦祥骥(1990—),男,安徽滁州人,博士,讲师。E-mail: dxj@cczu.edu.cn

引用本文:窦祥骥,林恺,何岩峰,等. 束缚水饱和度应力敏感致密气井动态特征研究[J]. 常州大学学报(自然科学版),2018,30(5):75-80.

well as the production performances. Therefore, during the dynamic inversion, production forecast and development plan formulation process of fractured water producing gas wells in tight reservoirs, the stress sensitivity of irreducible water saturation should be fully considered.

Key words: tight gas reservoir; fractured water-producing gas well; irreducible water saturation; stress-sensitivity; dynamic characteristics

随着天然气开发及应用的不断深入,致密气已成为我国能源体系中的重要一环^[1-3]。鉴于其特殊的储层条件,致密气藏在渗流过程中通常会呈现出一些复杂渗流现象^[4-6]。其中,当储层中存在气-水两相渗流时,由于微观孔喉结构及相间作用会随应力条件发生改变,束缚水饱和度也会随之动态变化,表现出应力敏感特征。束缚水饱和度应力敏感现象会对致密气藏中产水压裂气井的渗流特征产生显著的影响,进而影响气井的动态特征及开发效果。然而,当前对于束缚水饱和度应力敏感条件下致密气藏产水压裂气井动态特征的研究仍相对较少,尚缺乏考虑这一复杂现象的数学模型及对其影响的探讨。

针对该问题,本文在束缚水饱和度应力敏感模型的基础上,构建考虑这一复杂现象致密气藏气-水两相渗流模型并进行求解,并分析其对致密气藏产水压裂气井动态特征的影响,从而为后续的压裂效果评价及产能预测提供依据。

1 束缚水饱和度和应力敏感相渗模型

1.1 束缚水饱和度和应力敏感表征方法

在致密气藏中,束缚水是指气-水两相渗流过程中无法流动的水,而束缚水体积与孔隙总体积的比值即为束缚水饱和度^[7-8]。从内因角度分析,束缚水饱和度受储层微观孔喉结构、气-液-固分子间作用力等因素的影响。而对于致密气藏等非常规油气藏而言,由于生产过程中孔隙压力会不断发生变化,这会引起岩石中微观孔喉结构及分子间相间作用力的显著改变,最终导致了束缚水饱和度随之发生动态变化,这一现象便称为束缚水饱和度应力敏感。

近年来,针对束缚水饱和度随应力条件的变化特征,相关学者从理论模型及室内实验等多个角度出发,已取得了较为丰硕的研究成果。其中,基于 Khan^[9], Samuel^[10], Dong^[11] 等的实验研究,可回归获得束缚水饱和度端点值与地层压力之间的关系式,如式(1)所示

$$S_{wc} = S_{wci} \{1 + E [1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\} \quad (1)$$

式中: S_{wc} 是指某压力条件下的束缚水饱和度; S_{wci} 则为原始地层压力条件下的束缚水饱和度初始值; E 为束缚水饱和度应力敏感系数; γ 为相渗曲线应力敏感模数, MPa^{-1} ; p 为压力, MPa ; p_i 为原始地层压力, MPa 。其中, E 及 γ 均反映了束缚水饱和度应力敏感的程度,可利用室内实验进行确定。

1.2 相渗模型的建立

除了相渗曲线端点值外,相对渗透率曲线的弯曲形式也同样受到孔隙压力影响。Corey 等^[12] 基于室内实验研究成果和毛管理论,提出了相渗曲线形态的理论计算公式,在此基础上,可进一步加入对非等径毛管和毛管弯曲程度的考虑,从而更加贴近于致密储层的实际情况,称为修正的 Corey 模型。

$$k_{rg} = k_{rge} (1 - S_w^*)^\eta [1 - (S_w^*)^{1+\frac{\lambda}{2}}] \quad (2)$$

$$k_{rw} = k_{rwe} (S_w^*)^{\eta+1+\frac{\lambda}{2}} \quad (3)$$

其中,

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{gr}} \quad (4)$$

式中: k_{rg} 及 k_{rge} 分别为气相相对渗透率及其端点值; k_{rw} 及 k_{rwe} 分别为水相相对渗透率及其端点值; S_w^* 为标准化水相饱和度; S_w 为当前含水饱和度; S_{gr} 是指某压力条件下的束缚水饱和度; λ 为毛管分布指数, 用于表征毛管非等径程度; η 为毛管弯曲系数, 用于表征毛管的弯曲程度。

由以上分析可知, 对于致密气藏, 束缚水饱和度 S_{wc} 为压力的函数, 因此, 将式(1)代入式(4)得

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\}}{1 - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\} - S_{gr}} \quad (5)$$

进一步将式(5)代入式(2)、式(3)分别得到不同压力及饱和度条件下气相及水相相对渗透率计算模型, 如式(6)、式(7)所示:

$$k_{rg} = k_{rge} \cdot \left\langle 1 - \frac{S_w - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\}}{1 - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\} - S_{gr}} \right\rangle^\eta \cdot \left\langle 1 - \left\{ \frac{S_w - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\}}{1 - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\} - S_{gr}} \right\}^{1 + \frac{\lambda}{2}} \right\rangle \quad (6)$$

$$k_{rw} = k_{rwe} \cdot \left\langle \frac{S_w - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\}}{1 - S_{wci} \{1 + E[1 - e^{-\gamma(p_i - p)}]\} - S_{gr}} \right\rangle^{\eta + 1 + \frac{\lambda}{2}} \quad (7)$$

此时, 气-水相对渗透率均同时表现为压力及饱和度的函数, 即在相渗曲线中考虑了束缚水饱和度应力敏感现象, 从而为后期的研究提供了基础。

2 致密储层气-水两相渗流模型

由于致密气藏中通常不存在大型的边底水, 所产出的水主要为气层中的孔隙水^[13-15]。因此, 可结合束缚水饱和度应力敏感, 对致密储层气-水两相渗流模型作如下假设: ① 储层中为气-水两相等温渗流; ② 气相物性随压力发生变化; ③ 存在束缚水饱和度应力敏感, 即气-水的相对渗透率均为饱和度及压力的函数; ④ 储层中的井为含有一条垂直裂缝的压裂直井, 裂缝为无限导流能力; ⑤ 忽略毛管力及重力的影响。

此时的气相及水相渗流速度可以表示为式(8)、式(9)所示形式:

$$v_g = - \frac{k \cdot k_{rg} \langle p, S_w \rangle}{\mu_g \langle p \rangle} \nabla p \quad (8)$$

$$v_w = - \frac{k \cdot k_{rw} \langle p, S_w \rangle}{\mu_w \langle p \rangle} \nabla p \quad (9)$$

式中: v_g 及 v_w 分别为气相及水相的渗流速度, (m^3/d); k 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_{rg} 及 k_{rw} 均同时为压力及饱和度的函数; 而气相黏度 μ_g 及水相黏度 μ_w 均为压力的函数, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

基于式(8)、式(9), 并结合地层条件下的连续性方程及相关状态方程, 可得地面标况下的连续性方程:

$$\nabla \cdot \left[\frac{k \cdot k_{rg}}{B_g \mu_g} \cdot \nabla p \right] + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} \right) \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \left[\frac{k \cdot k_{rw}}{B_w \mu_w} \cdot \nabla p \right] + \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (11)$$

式中: B_g 及 B_w 分别为气相及水相的体积系数; q_g 及 q_w 为产气量及产水量, (m^3/d); ρ_{gsc} 及 ρ_{wsc} 为地面条件下的气体及水的密度, (kg/m^3); S_g 为含气饱和度; t 为时间, d 。

在此基础上, 可进一步推导获得气-水两相基本微分方程

$$B_g \left\{ \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rg}}{B_g \mu_g} \cdot \nabla p \right] + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} \right\} + B_w \left\{ \nabla \cdot \left[\frac{k k_{rw}}{B_w \mu_w} \cdot \nabla p \right] + \frac{q_w}{\rho_{wsc}} \right\} = \phi C_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

基于式(12),通过有限差分中的IMPES方法进行求解,从而构建相应的数值模型,并利用Fortran语言编写了相应的三维两相(气-水)数值模拟软件。值得注意的是,方程中的系数采用的是显式计算方法,即利用 t 时刻的压力及饱和度数值来计算相对渗透率等关键参数,再进一步计算获得 $t+1$ 时刻的压力,从而最终实现了束缚水饱和度应力敏感条件下压力及产量特征的计算。

3 束缚水饱和度应力敏感的影响

3.1 对相渗曲线形态的影响

束缚水饱和度应力敏感最直接的影响是会导致相渗曲线随地层压力发生变化^[16-17]。为研究该影响的特征,基于表1中的参数并分别假设束缚水饱和度应力敏感系数(E 值)为8,16,利用式(6)、式(7)计算获得不用压力条件下的相渗曲线特征,如图1所示。

表1 模型基础参数

参数	数值	参数	数值
绝对渗透率/ μm^2	0.1×10^{-3}	孔隙度	10%
裂缝半长/ m	100	原始地层压力/ MPa	30
储层厚度/ m	10	应力敏感模数/ MPa^{-1}	0.003

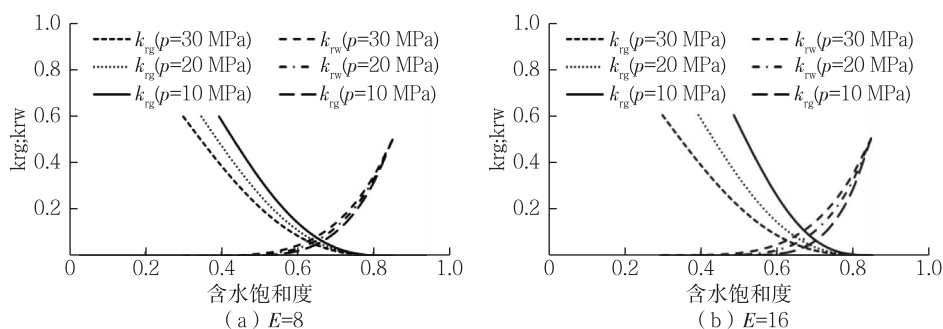


图1 E 值所对应的相渗曲线随压力变化特征

由图1可知,当 E 为8或16时,相渗曲线上的束缚水饱和度存在着应力敏感性。此时,随着地层压力的降低,气相及水相的相渗曲线均向右侧偏移。该变化会导致同一含水饱和度所对应的气相相对渗透率随压力的降低而增大,而水相相对渗透率则随地层压力的下降而减小,且含水饱和度越小,相对渗透率随压力的变化幅度越大。相同压力下降幅度条件下,气相及水相相渗曲线的偏移程度均与 E 值正相关。

3.2 对压力响应特征的影响

由于束缚水饱和度应力敏感会对不同压力条件下的相渗曲线特征造成影响,因此也会进一步的影响气-水两相压力响应特征。基于表1,分别假设束缚水饱和度应力敏感系数(E 值)为0,8及16,构建相应的数值模型,以定产气量进行模拟,从而绘制压力导数的双对数曲线(压力响应特征曲线),结果如图2所示。

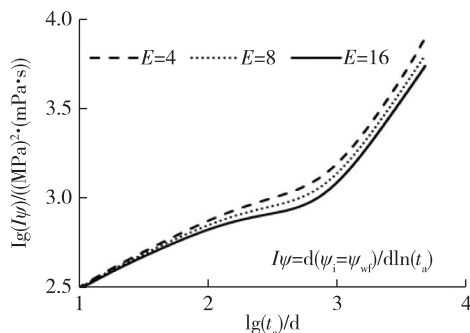


图2 E 值对压力导数双对数曲线的影响

由图2可知,束缚水饱和度应力敏感会导致压力导数曲线向下方偏移,此时边界控制流的斜率会略小于1。这是因为当存在束缚水饱和度应力敏感时,束缚水饱和度随压力降低而增加,从而导致了同一含水饱和度对应的气相有效渗透率的增大,并引起了压力导数曲线的向下偏移。而实际上,压力导数曲线的微小变化便会对渗流方式的识别及相关参数的确定造成较为显著的影响。因此,在利用试井分析、不稳定产量分析(RTA)等方法进行储层及裂缝参数动态反演时,应考虑束缚水饱和度应力敏感性,以提高反演结果的准确性。

3.3 对产量特征的影响

进一步分析束缚水饱和度应力敏感对致密气藏产水气井生产动态特征的影响,假设 E 值为0,4,8,12及16,以定产气量 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 为工作制度,研究了束缚水饱和度应力敏感对气井稳产时间、稳产期累计产气量、稳产期平均水气比及稳产期累计产水量等生产动态特征的影响,如图3所示。

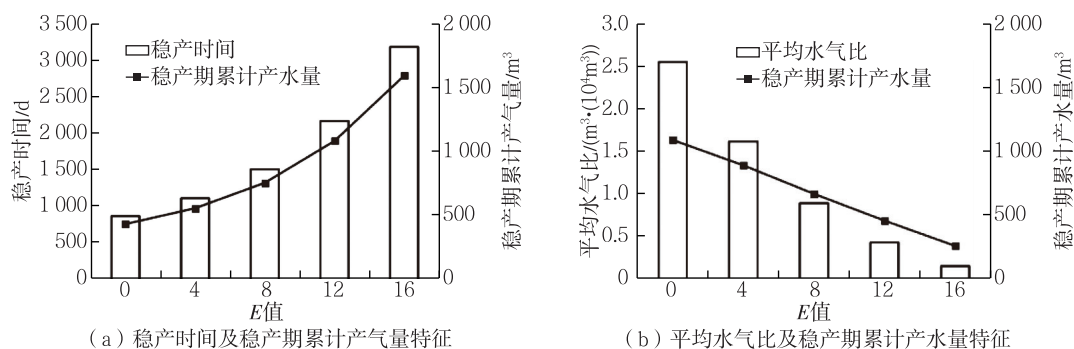


图3 不同 E 值对应的生产动态特征

由图3可知,随着 E 值的增大,气井的稳产时间及稳产期累计产气量均显著增加。这是由于当存在束缚水饱和度应力敏感时,同一含水饱和度所对应的气相有效渗透率($k_g S_w$)会随压力的降低而不断增大。且 E 值越大,相同压降幅度下的 $k_g S_w$ 增加值也更明显,从而导致了稳产时间及稳产期累计产气量的增加。另一方面,随着 E 值的增加,稳产期平均水气比会显著降低。这是由于束缚水饱和度应力敏感的存在导致随着地层压力的降低,同一含水饱和度对应的水相与气相有效渗透率比值快速减小。同时,由于稳产时间的增加幅度小于平均水气比的降低幅度,因此稳产期累计产水量随着 E 值的增加会有所降低。

因此,束缚水饱和度应力敏感会对气-水相渗曲线、产水气井压力响应曲线及产量特征均产生显著影响,在致密气藏产水压裂气井动态反演、产能预测、合理开发方案制定等过程中,应充分考虑这一特殊现象,以实现对于此类气井的高效开发。

4 结 论

1)致密气藏中的束缚水饱和度会随应力发生改变,此时的气-水相对渗透率可基于束缚水饱和度应力敏感合理表征方法及修正的Corey模型进行确定。

2)在考虑束缚水饱和度应力敏感的基础上,可建立相应的渗流数学模型,并利用IMPES方法进行求解,从而实现束缚水饱和度应力敏感条件下压力及产量特征的计算。

3)由于束缚水饱和度应力敏感现象的存在,当地层压力下降时,气-水相渗曲线的形态会发生变化,压力响应特征曲线则出现偏移,气井的产量特征也会显著改变。

参考文献:

- [1]成景烨,邢漪冉,何岩峰,等.页岩气储层基质纳米孔隙渗流模型研究进展[J].常州大学学报(自然科学版),2017,29(2):86-92.
- [2]朱春明,王新根,董社霞,等.临兴区块致密气井油管直径优选研究[J].石油机械,2017,45(4):74-78.
- [3]李雪.低渗透油藏储层特征及形成机理分析[J].常州大学学报(自然科学版),2015,27(3):39-44.
- [4]HOLDITCH S A. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6):86-93.
- [5]FREEMAN C M, MORIDIS G, ILK D, et al. A numerical study of performance for tight gas and shale gas reservoir systems[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2013, 108(3):22-39.
- [6]李士伦,孙雷,杜建芬,等.低渗致密气藏、凝析气藏开发难点与对策[J].新疆石油地质,2004,25(2):156-159.
- [7]李宁,周克明,张清秀,等.束缚水饱和度实验研究[J].天然气工业,2002,22(s1):110-113.
- [8]桂婷婷,魏东,王继平,等.气藏束缚水饱和度实验测试与机理[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):81-84.
- [9]KHAN A H. Shear induced relative permeability changes in uncemented sands[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2009.
- [10]SAMUEL O. Coupling of stress dependent relative permeability and reservoir simulation[D]. Edmonton: University of Alberta, 2012.
- [11]DONG C, PAN Z, LIU J, et al. An improved relative permeability model for coal reservoirs[J]. International Journal of Coal Geology, 2013,18(2):45-57.
- [12]COREY A T. The interrelation between gas and oil relative permeability[J]. Producers Monthly, 1954, 19(2):38-41.
- [13]朱华银,徐轩,安来志,等.致密气藏孔隙水赋存状态与流动性实验[J].石油学报,2016,37(2):230-236.
- [14]胡勇,朱华银,杨敏,等.致密砂岩气藏储层岩石孔隙水可动性评价[J].能源科学发展:中英文版,2013(2):16-21.
- [15]李奇,高树生,杨朝蓬,等.致密砂岩气藏阈值梯度对采收率的影响[J].天然气地球科学,2014,25(9):1444-1450.
- [16]宋春涛.考虑应力敏感和启动压力梯度的低渗透油藏数值模拟研究[J].科学技术与工程,2012,12(25):6319-6326.
- [17]王坤,张烈辉.考虑应力敏感超低渗油藏油水相对渗透率的计算[J].石油天然气学报,2011,33(11):117-119.

(责任编辑:殷丽莉)

【上接第 74 页】

- [9]LEE H, ONG S H, AZEEMUDDIN M, et al. A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 96/97: 109-119.
- [10]邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008:76-85.
- [11]陈勉,金衍,张广清.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [12]刘厚彬,勤睿,孟英峰,等.辉绿岩地层井壁垮塌机理及主控因素实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(8):121-127.
- [13]胡广强,白彬珍,柯珂.顺北区块辉绿岩井段井壁稳定性分析[J].中国海上油气,2017,29(5):119-125.
- [14]刘彪,潘丽娟,易浩,等.顺北含辉绿岩超深井井身结构优化设计[J].石油钻采工艺,2016(3):296-301.
- [15]赵志国,白彬珍,何世明,等.顺北油田超深井优快钻井技术[J].石油钻探技术,2017(6):8-13.
- [16]商森,王颖慧.顺北区块辉绿岩安全钻井技术[J].云南化工,2018(3):164.
- [17]辛泽宇.顺托1井钻遇含辉绿岩层位施工因素优选[J].内蒙古石油化工,2016(10):77-81.
- [18]赵波,王贵新,刘万纯.塔里木盆地顺北区块优快钻井模式研究[J].中国石油和化工标准与质量,2017(4):63-64.

(责任编辑:殷丽莉)