

考虑束缚水影响的变形介质气藏产能方程

刘文涛^{1,2} 王洪辉³ 李毓⁴ 葛善良¹ 黄建成¹

1.成都理工大学 2.中国石油大港油田公司 3.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·成都理工大学
4.中国石化西南油气分公司博士后科研工作站

刘文涛等.考虑束缚水影响的变形介质气藏产能方程.天然气工业,2009,29(3):82-84.

摘要 低渗透致密砂岩气藏由于其高有效应力容易导致储层产生应力敏感损害,与常规气藏在生产动态及产能评价等方面存在着明显差异。常规方法通过增加干燥岩样的净围压来模拟地层有效应力的变化直接分析储层的应力敏感程度,忽略了实际储层孔隙空间中的束缚水,从而影响了应力敏感性分析的准确性。利用干气驱的方法建立岩心的束缚水饱和度,通过分析含束缚水饱和度的岩心渗透率随有效应力的变化关系,研究讨论了低渗透含束缚水岩心在覆压实验中的变形特征。结果表明,含束缚水岩样的储层应力敏感损害程度大于干燥岩样,其应力敏感实验曲线特征为早期随着有效应力升高渗透率降低幅度明显,后期则趋于平缓,其间存在一个与原地有效应力相对应的应力敏感区间。在综合考虑启动压力梯度和含束缚水的基础上,建立了变形介质气藏的产能方程,为今后矿场建立较为合理的产能方程提供了参考依据。

关键词 致密砂岩 气藏 应力分析 束缚水饱和度 生产能力 方程

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.03.024

0 引言

我国低渗透致密砂岩气藏分布领域广泛、类型多样,在开发中所表现出的一些特殊现象(如储层应力敏感性、存在启动压力梯度和受束缚水影响等特征)与常规气藏生产动态及产能评价存在着明显差异。而近年来的一些有关储层多孔介质变形研究成果均是在实验室内针对干燥岩样实验取得的,即实验室一般都是采用增加干燥岩样的净围压来模拟地层有效应力的变化,从而分析储层的应力敏感程度。而在实际储层中,孔隙空间中通常含有水,具有一定的含水饱和度。由于含水饱和度的存在,一方面会影响到岩石的变形;另一方面也要影响到储层渗透率的大小随有效应力的变化。根据上述依据,笔者利用干气驱的方法建立岩心的束缚水饱和度,并获得了含束缚水饱和度的岩心渗透率随有效应力的变化关系,研究讨论了低渗透含束缚水岩心在覆压实验中的变形特征,将实验研究结果与理论研究成果相结合,推导建立了考虑岩石应力敏感性和受束缚水影响的气井产能公式,为今后建立较为合理的产能方程提供参考依据^[1-6]。

1 实验结果分析及应力敏感性评价

1.1 实验方法

实验选用四川盆地典型低渗透致密砂岩岩样。

1)岩样选取:采集岩样,并将同一位置取得的岩样分成3份,其目的是为了进行对比分析。

2)岩样实验前准备:将待实验岩样放在烘烤箱中进行干燥。

3)设计实验岩样饱和束缚水量,根据研究区块测井解释结果表明最低含水饱和度在20%左右,本次实验设计岩样含水饱和度(S_w)分别为0、20%、50%。利用岩心驱替实验装置,建立岩样的束缚水饱和度。

4)近似取上覆岩石压力与岩石内孔隙流体压力之差为有效覆压,用围压来模拟上覆岩层压力,再以增加围压使得地层有效覆压增加的方式来模拟由于地层孔隙压力不断下降而引起逐渐增加的岩石骨架所承受的有效覆压。实验步骤是先逐渐升高围压,至储层最大净上覆压力(40 MPa)后,逐渐降低围压至最小值。实验使用的流体介质为干燥氮气,由于实验中孔隙压力不超过0.3 MPa,因此在本实验中

作者简介:刘文涛,1970年生,高级工程师,博士研究生;长期从事石油地质研究及石油开发管理工作。地址:(061003)河北省沧县中国石油大港油田采油三厂。电话:13084456491。E-mail:yulihozo@163.com

近似认为围压即为储层岩石的有效覆压,范围为2~40 MPa,其中每块岩心实测8个渗透率点。

1.2 实验结果分析

1.2.1 覆压条件下含束缚水岩心渗透率变化规律

气藏都含有一定量的束缚水,束缚水会对岩心的应力敏感性产生较大程度的影响。图1为常温条件下两个含束缚水岩样渗透率随有效应力变化的关系曲线。从图中可以看出,随着有效应力的增加,不管是干燥岩样,还是含水岩样,渗透率都存在着明显的降低趋势。渗透率下降曲线存在一个应力敏感拐点区间,拐点区间之前岩石渗透率下降很快,拐点区间之后降幅趋于平缓。当有效应力达到25 MPa以上时,渗透率的变化已经不明显,并且干燥岩样和束缚水岩样的渗透率大小比较接近。这种变化规律与大多数文献研究结果所得到的变化规律是一致的。其中拐点区间的位置因岩样而异,对于本次实验样品,拐点区间大体在应力值为10~15 MPa的地方。

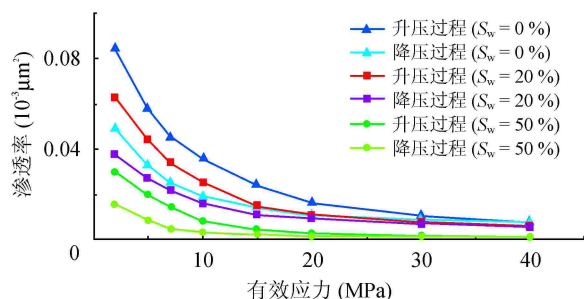


图1 含束缚水岩样渗透率与有效应力关系曲线图

分析图1可以发现,含束缚水岩样的初始渗透率要明显低于干燥的岩样渗透率,说明束缚水的存在影响了岩石的初始渗透率。围压2 MPa条件下初始渗透率为 $0.085 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,当含水饱和度为20%时,岩心渗透率约有25%的降幅;当含水饱和度达到50%时,岩心渗透率值约有65%的降幅。而当有效应力增大至20 MPa时,当含水饱和度为20%左右,岩心渗透率约有40%的降幅;当有效应力增大至40 MPa时,而含水饱和度值为50%左右时,岩心渗透率约有85%的降幅。所以,束缚水饱和度和有效应力共同作用严重影响了低渗透岩心的渗透率值。究其原因是由于低渗透岩样致密,孔隙结构极其细小和复杂,容易吸附较多的水,在孔壁上形成水膜,致使微观上通过流体的储层多孔介质通道狭窄,造成低渗透含水气藏毛细管压力普遍变高,严重地影响了气体渗透率大小。因此,对于含束缚水的低渗透气藏在进行衰竭式开采时,储层中的流体不但要受应

力敏感性的影响,同时也会受到束缚水的影响。

1.2.2 干燥岩样与含束缚水岩样产生滞后效应对比

在气田开发中,常有多次开井和关井的情况出现,对应力敏感性较强的气井,每次开关井都会对储层渗透率产生一定的影响,这种影响有些是暂时的,有些是永久的。在进行应力敏感性实验的同时也进行了降压实验,以评价压力恢复对致密砂岩气藏岩心渗透率的影响。

从图1中可以看出,随着卸载的进行即有效覆压的恢复,渗透率有所恢复,但不能恢复到加载时有有效覆压所对应的渗透率初始值,也就是说低渗透储层的受压变形不是弹性的,存在塑性影响。对于 $S_w=0$,当压力从2 MPa增加到40 MPa时,渗透率从 $8.5 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 下降至 $0.75 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,下降了91.1%,当压力从40 MPa再降低到2 MPa时,岩样渗透率恢复到 $5.2 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,没有恢复到初始渗透率,其渗透率相对损失率达到38.8%;与此相似的还有当 $S_w=20\%$ 时,卸载实验结束后,渗透率从初始值 $6.3 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 下降至 $3.7 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,其渗透率相对损失幅度为41.3%;当 $S_w=50\%$ 时,卸载实验结束,渗透率从初始值 $3.0 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 下降至 $1.6 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,渗透率相对损失幅度达到46.2%。因此,与干燥岩样相比,含束缚水岩样的渗透率降低幅度要更大,说明束缚水饱和度的存在使得变形介质储层渗透率更易遭受损害,且含水饱和度越高,储层岩石渗透率受损害也越明显,水锁效应越显著。

2 考虑含束缚水气藏流体渗流数学模型建立

在低渗透气藏成藏过程中,储层普遍含水饱和度和较高,而在微观上,通过流体的多孔介质通道比较狭窄,这些造成气体在低渗透储层中的开发难度加大,当含水饱和度较高时,气体的渗流存在非达西渗流现象。众多实验研究已表明,低渗透储层的渗流不符合达西定律,而是存在一个临界压力梯度。由此可见,在低渗透气藏产能预测及气藏数值模拟过程中考虑临界压力梯度的影响是有必要的。笔者在前人研究已建立的低渗透变形介质气藏单相气井产能模型的基础上,综合考虑气体自身存在的应力敏感性和由含束缚水饱和度造成的临界压力梯度效应等特征,建立了低渗透气藏复杂气井产能公式^[7-10]。

基本假定:①只存在束缚水和气体,不存在可动水,气体作拟单相渗流;②天然气视为理想气体,气体为等温渗流;③均质气藏,不考虑裂缝的影响;

④储层可压缩,储层孔隙度、渗透率随孔隙压力变化而发生变化;⑤气体渗流存在临界压力梯度,忽略重力影响。

考虑临界压力梯度的基本数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dr} - \lambda_r = \frac{\mu v}{K} & \frac{dp}{dr} \geq \lambda_r \\ v = 0 & \frac{dp}{dr} < \lambda_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为气体压力; r 为径向距离; μ 为气体黏度; K 为储层渗透率; v 为渗流速度; λ_r 为临界压力梯度。

假定气井以 Q_{sc} 产量生产,则渗流速度如下:

$$v = \frac{q}{2\pi rh} = \frac{1}{2\pi rh} \frac{p_{sc} Z T}{T_{sc} p} Q_{sc} \quad (2)$$

式中: h 为气层厚度; T 为地层温度; T_{sc} 为标准温度; Z 为平均偏差因子; Q_{sc} 为标准状况下的体积流量。

将式(2)代入式(1)可得:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dr} - \lambda_r = \frac{\mu}{K} \frac{1}{2\pi rh} \frac{p_{sc} Z T}{T_{sc} p} Q_{sc} & \frac{dp}{dr} \geq \lambda_r \\ v = 0 & \frac{dp}{dr} < \lambda_r \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)第1个表达式进行变形可得:

$$2 \frac{p}{\mu Z} \frac{dp}{dr} = \frac{Q_{sc}}{\pi rh K} \frac{p_{sc} T}{T_{sc}} + \lambda_r \cdot 2 \frac{p}{\mu Z} \quad (4)$$

对式(4)进一步简化。令 $d\psi = \frac{2p}{\mu Z} dp$, $a = \frac{1}{\pi h}$

$\frac{p_{sc} T}{T_{sc}}$, $\lambda_0 = \frac{2\lambda_r p}{\mu Z}$, 则式(4)写成以拟压力为变量的方程:

$$\frac{d\psi}{dr} - \lambda_0 = \frac{a}{K r} Q_{sc} \quad (5)$$

代入渗透率的变异关系式,在此为了推导方便,假定渗透率变异关系遵循指数变形方程,则有:

$$\frac{d\psi}{dr} - \lambda_0 = \frac{1}{K_0 \exp[\alpha(\psi - \phi)]} \frac{a}{r} Q_{sc} \quad (6)$$

式中: α 为渗透率模量; ϕ 为原始地层拟压力; ψ 为开采过程中拟压力。

再令 $\varphi = \exp[-\alpha(\psi - \phi)]$,代入式(6)整理可得:

$$\frac{d\varphi}{dr} - \alpha \lambda_0 \varphi = \alpha \frac{a}{K_0 r} Q_{sc} \quad (7)$$

由此可得式(7)的解为:

$$\varphi = \exp(\alpha \lambda_0 r) \left\{ \alpha \frac{a}{K_0} Q_{sc} [\ln r - \alpha \lambda_0 r] + c \right\} \quad (8)$$

代入如下边界条件 $\psi(r) = \phi$, $r = r_e$ 至式(8),由此可求得气井产量公式为:

$$Q_{sc} = \frac{\pi h T_{sc} K_0}{p_{sc} T \alpha} \times$$

$$\frac{1 - \exp\left\{ \alpha \left[\lambda_0 (r_e - r_w) + \phi - \psi \right] \right\}}{\exp\left\{ \alpha \lambda_0 r_e \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \alpha \lambda_0 (r_e - r_w) \right] \right\}} \quad (9)$$

该气井产能公式综合考虑了储层岩石的启动压力梯度和含束缚水影响,因而可以更为准确和切合实际地为气藏配产提供依据。

3 结束语

低渗透致密气藏属于变形介质气藏,对于该类气藏,其渗透率和孔隙度等物性参数随压力和束缚水饱和度变化较为敏感。因此,在建立该类型产能方程时,有必要充分考虑气藏渗透率和孔隙度的应力及束缚水等环境因素的敏感性,才能更加准确的模拟气藏和气井的生产动态特征。从所建的综合考虑由束缚水饱和度表征的临界压力梯度和应力敏感性影响的气井产能方程来看,对于变形介质气藏,气井配产不宜太大,否则对稳产期的采出程度影响较大。

参考文献

- [1] 赵勇昌,朱华银,李允.克拉2气田的储层应力敏感性[J].天然气工业,2008,28(6):102-104.
- [2] 黄全华,李士伦,唐海,等.低渗应力敏感地层凝析气井试井分析[J].天然气工业,2007,27(4):95-97.
- [3] 石玉江,孙小平.长庆致密碎屑岩储集层应力敏感性分析[J].石油勘探与开发,2001,28(5):85-87.
- [4] 王彬,梅海燕,张茂林.低渗透气藏气体渗流速度修正式[J].西南石油学院学报,2004,26(1):32-34.
- [5] 阮敏,王连刚.低渗透油田开发与压敏效应[J].石油学报,2002,23(3):73-76.
- [6] 罗瑞兰,程林松,彭建春,等.确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(2):87-90.
- [7] 葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001.
- [8] 黄辉.有效压力对低渗透变形介质油藏物性影响的研究[J].石油与天然气地质,2007,28(4):535-538.
- [9] 杨满平,李治平,王正茂,等.变形介质气藏渗流理论的发展及研究意义[J].西南石油学院学报,2003,25(6):23-26,34.
- [10] 贺伟,冯曦,钟孚勋.低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J].天然气工业,2002,22(增刊):91-94.

(修改回稿日期 2009-02-01 编辑 韩晓渝)