

页岩气储层蠕变特性及其对页岩气开发的影响

苗文培¹,姜汉桥¹,葛洪魁²,王小琼²

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中国石油大学(北京)非常规天然气研究院,北京 102249)

摘要:页岩气储层渗透率极低,必须经过压裂改造才能形成有效产能,大量狭小自支撑裂缝在天然气解吸及流动中具有重要作用。页岩气储层生产周期长,人工裂缝导流能力对裂缝变形极其敏感。研究表明,页岩气储层具有一定的蠕变特性,并随着粘土含量的增加而增强。压裂改造后,储层会产生大量裂缝,裂缝闭合蠕变是蠕变形式的主要形式。裂缝的存在会使储层蠕变速率大幅度提高,并对裂缝导流能力产生不可忽视的影响。裂缝闭合蠕变速率与裂缝界面之间、裂缝界面与支撑剂间的相互作用有关,并与基质蠕变速率成正比。压裂改造形成的裂缝网络越发育、单裂缝宽度越小,蠕变对裂缝导流能力的影响越大。在页岩气数值模拟中,考虑裂缝闭合蠕变的累积产量与未考虑裂缝闭合蠕变的累积产量相差较大。同时,在地应力计算、储层可改造性、支撑剂和施工参数优选以及生产方式的选择等方面也应考虑蠕变的影响,保持流体压力有利于减小蠕变变形,维持裂缝导流能力,提高气井产能和采收率。

关键词:页岩气储层 蠕变 裂缝 裂缝导流能力 裂缝闭合蠕变

中图分类号: TE37

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)04-0097-04

蠕变是材料变形随时间逐步增大的一种现象,它对材料的长期形变、强度和渗流特性具有重要影响,在矿山、隧道、核废料储存及大型储气库建设等方面应用十分广泛^[1]。各类岩石都具有不同程度的蠕变特性,通常蠕变研究多是针对具有较高蠕变性能的软岩(泥岩和盐岩),周祖辉等在实验室建立了岩石三轴蠕变实验装置,对泥岩和盐岩开展了蠕变实验,建立了蠕变经验模式及本构方程,用于分析套管的岩压外载和井眼稳定性^[2-4]。

目前,页岩气已成为中国重要的油气接替资源之一。页岩气储层总体上属于较脆岩石,渗透率极低,须经过压裂改造才能形成有效产能^[5]。压裂成败的关键在于是否形成大规模的、相互沟通和稳定的裂缝网络^[6]。Sone等研究发现页岩气储层基质具有一定的蠕变性^[7]。页岩气储层人工裂缝网络的存在及其对微弱变形的极其敏感性使得页岩气储层蠕变研究变得重要。压裂改造后的页岩气储层具有开采年限长、人工裂缝网络发育、裂缝开度小等特点,导致裂缝导流能力对即使微弱的蠕变都非常敏感。蠕变会引起页岩气储层裂缝闭合,影响其导

流能力并对气井产能和最终采收率产生影响。

在裂缝闭合对导流能力影响方面,刘向君等利用有限元数值模拟,分析了应力作用下不同产状、不同开度裂缝的闭合规律,得出在垂向应力作用下,地层中发育的水平裂缝易发生闭合,应保持地层压力开采^[8]。朱贺对泥岩裂缝性储层闭合压力及应力敏感性进行了研究,发现在应力作用下裂缝产生形变导致闭合,使地层渗透率下降、油气井产能迅速下滑^[9]。但以上对于裂缝的闭合研究主要是考虑储层弹塑性变形,没有考虑蠕变效应的影响。为此,笔者对页岩气储层蠕变性质的研究进行了总结,并分析其对页岩气开发的影响,以为页岩气实际生产提供一定的指导。

1 页岩气储层基质蠕变及影响因素

杨满平等研究了变形介质气藏储层渗透率的变化,发现渗透率变化的主要影响因素包括弹性模量、含水饱和度、上覆岩层压力和应力^[10]。Sone和Zoback对页岩气储层岩心的蠕变性进行了实验研

收稿日期:2014-05-03。

作者简介:苗文培,男,在读硕士研究生,从事油气数值模拟研究。联系电话:15101148771, E-mail: miaowenpei1989@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“富有机质页岩波速各向异性的实验研究”(41304141),中国石油大学(北京)引进人才科研启动基金项目“页岩储层可压性室内评价方法研究”(YJRC-2012-03),重庆市国土资源和房屋管理局科技计划重大项目“页岩气高效开发关键技术攻关与实践”(CQGT-KJ-2012)。

究,发现页岩气储层基质具有一定的蠕变特性,并给出了页岩蠕变速率的影响因素^[11]。

1.1 页岩气储层基质具有蠕变性

Sone 和 Zoback 以美国 Barnett 和 Haynesville 页岩气储层为例,根据样品的粘土含量将其分为4组(表1),分别对其进行三轴应力实验,观察岩样的蠕变行为。结果表明:岩样在较短时间内达到弹性应变,随着时间的增加,应变继续变大,表现出随时间增大的蠕变特征;蠕变应变随粘土含量的增加而增大,随杨氏模量增大而减小。蠕变应变与时间成幂指数关系,其表达式为

$$\varepsilon = B(\sigma, E)t^n \quad (1)$$

式中: ε 为蠕变应变; B 为差应力与杨氏模量的函数; σ 为差应力,MPa; E 为杨氏模量,MPa; t 为时间, a ; n 为反映岩心蠕变变形的时间依赖性特征参数,其值为0~1。

表1 岩样参数

岩样	埋深/m	杨氏模量/GPa	粘土含量,%
Barnett Dark	2 600	20~40	30~45
Barnett Light	2 600	58~62	2~7
Haynesville Dark	3 500	15~20	34~43
Haynesville Light	3 500	35~38	22~24

对于页岩蠕变, B 值与岩石的弹性特征及差应力有关, n 值决定了蠕变变形时间依赖性的强弱。

1.2 页岩气储层基质蠕变的影响因素

粘土含量 页岩中的矿物组分可分为2种,一种是硬组分(石英、长石、黄铁矿和碳酸盐),另一种是软组分(粘土和干酪根)。粘土含量越高,杨氏模量就越小,岩石的流变特性越明显,蠕变速率越快。

应力 页岩蠕变与应力成线性正相关,随应力的增大而增大。同时,页岩气储层具有较强的各向异性,在不同应力方向上的蠕变应变存在很大差异,垂向蠕变速率较大,横向蠕变速率较小。

含水饱和度 孔隙流体对页岩蠕变影响较大,其不但能够降低岩石表面的自由能,弱化岩石强度,还可增强岩石的蠕变能力,提高页岩的蠕变速率。干燥岩样的蠕变速率小于饱和水岩样的蠕变速率^[8]。

2 压裂改造后的页岩气储层蠕变及影响因素

页岩气储层压裂改造与常规储层压裂改造不同,其要求形成复杂的弥散式体积裂缝网络,即体

积压裂^[12]。人工裂缝网络由压裂新造缝和通过剪切、滑移等重启形成的天然(微)裂缝组成。而这些人工裂缝中,大部分无法进行有效支撑,只是靠裂缝面的相对滑移形成自支撑裂缝。因此,在地层压力条件下,要求非支撑裂缝具有允许气体有效流动的能力^[13]。同时,相对于宽度较大的支撑剂支撑裂缝,这些自支撑裂缝对于即使微弱的蠕变变形也非常敏感。

压裂改造后储层中含有大量裂缝,裂缝闭合蠕变是蠕变形变的主要形式。Sone 和 Zoback 仅考虑了页岩储层基质(包含岩石基质和原生孔隙、裂隙)的蠕变,并没有考虑含有人工裂缝的页岩蠕变。压裂裂缝是页岩气储层中的薄弱部分,应力作用下会发生裂缝的闭合。蠕变变形也将首先且主要发生在裂缝处,包括水力压裂新造裂缝和原有裂隙剪切滑移产生的自支撑裂缝。王小琼研究裂缝对蠕变速率的影响实验结果表明,裂缝的存在可大幅度提高花岗岩样品的蠕变速率^[14]。

裂缝缝面的蠕变变形与基质蠕变、支撑剂、裂缝粗糙度和闭合应力有关。页岩气储层中存在着大量处于闭合状态的天然裂缝,并且其中含有填充物。在压裂改造过程中,裂缝缝面之间会发生相对滑动,粗糙的缝面会产生自支撑作用,形成具有导流能力的裂缝。裂缝粗糙度越高,自支撑作用越明显,裂缝开度越大,裂缝导流能力越强。裂缝闭合蠕变速率与裂缝界面之间、裂缝界面与支撑剂间的相互作用有关,并与基质蠕变速率成正比。压裂改造形成的裂缝网络越发育、单裂缝宽度越小,蠕变对裂缝导流能力的影响越大。

经压裂改造后的页岩气储层引入了大量的外来流体,也将增大页岩气储层的蠕变变形。支撑剂长期受到裂缝缝面的压力作用会发生变形,在长时间地应力作用下,页岩的蠕变将使支撑剂的嵌入增大,影响裂缝导流能力。

3 页岩气储层蠕变对页岩气开发的影响

3.1 对裂缝导流能力的影响

压裂改造后的页岩气储层有着极其庞大并且复杂的裂缝网格体系,裂缝导流能力控制着气井生产能力^[15]。由于页岩渗透率极低,即使蠕变应变使裂缝导流能力发生细微的改变都会对页岩气井产能产生很大影响。因此,在页岩气开发过程中应考虑页岩蠕变对裂缝导流能力的影响。

裂缝导流能力等于裂缝渗透率与裂缝宽度的乘积^[16-17],其表达式为

$$C_f = K_f w_f \quad (2)$$

式中: C_f 为裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; w_f 为裂缝宽度, cm 。

页岩气储层蠕变主要发生在裂缝处。蠕变应变随时间增加,裂缝宽度随时间减小,进而导致裂缝导流能力下降。裂缝宽度与页岩蠕变之间的关系式为

$$w_f' = w_f(1 - \varepsilon) \quad (3)$$

式中: w_f' 为蠕变形变后的裂缝宽度, cm 。

联立式(2)与式(3),得到裂缝导流能力与蠕变之间的关系式为

$$C_f' = K_f w_f' = K_f w_f(1 - \varepsilon) \quad (4)$$

式中: C_f' 为蠕变形变后裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

从式(4)可以看出,页岩蠕变形变越大,裂缝宽度越小,裂缝导流能力也越小。

3.2 对页岩气井产能的影响

为了说明页岩气储层蠕变对页岩气生产的影响,笔者将页岩气储层中复杂的裂缝网络简化成裂缝—基质的双重介质模型,进行了气井产能数值模拟^[17-19]。

根据 Warren-Root 双重介质模型,建立页岩气藏双重介质渗流模型。运用质量守恒和达西定律获得页岩气储层裂缝中气体的流动方程为

$$\nabla \left(\frac{K_f'}{\mu_f} \rho_f \nabla p_f \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi_f \rho_f) + \frac{\partial}{\partial t} (\phi_m \rho_m) \quad (5)$$

其中

$$K_f' = K_f(1 - \varepsilon) = K_f(1 - Bt^n) \quad (6)$$

式中: K_f' 为蠕变形变后的裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_f 为裂缝中气体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ_f 为裂缝中气体密度, g/cm^3 ; p_f 为裂缝内压力, MPa ; ϕ_f 为裂缝内孔隙度; ϕ_m 为储层基质孔隙度; ρ_m 为基质中气体密度, g/cm^3 。

通过式(4)可以看出,裂缝导流能力的变化取决于裂缝宽度的变化。但是,裂缝宽度变化在数值模拟中不易实现,所以假定模型中裂缝宽度不变,通过改变裂缝渗透率来研究页岩气储层蠕变对页岩气井产能的影响。

页岩气模型参数包括:页岩气储层长度和宽度均为 1 000 m,储层厚度为 30 m,埋深为 2 500 m,气藏温度为 90 °C,裂缝间距为 20 m,气藏初始地层压力为 30 MPa,裂缝平均孔隙度为 15%,基质平均孔隙度为 6%,初始含水饱和度为 30%,基质渗透率为 $0.0001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝初始渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

模拟结果(图1)表明,随着开采时间的延长,蠕变特性对于累积产气量的影响越来越大,生产 15 a,考虑蠕变的累积产气量比未考虑蠕变的累积产气量减少了约 25%。在页岩气井较长的开发年限中,页岩气储层中裂缝的蠕变形变随时间的延长也会逐渐增大,进而降低裂缝导流能力,最终影响页岩气井产能。准确预测页岩气井产能在页岩气开发中具有重要的作用,因此在页岩气数值模拟中应考虑页岩气储层的蠕变行为。

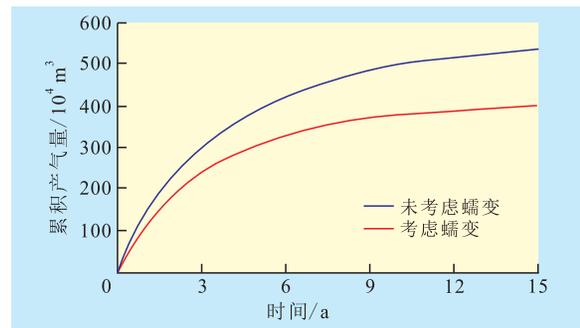


图1 页岩气储层蠕变对累积产气量的影响

3.3 对地应力计算的影响

地应力的方向、大小和各向异性是页岩气储层体积压裂设计的重要参数。在长期的地质时期中,页岩气储层所具有的蠕变特性对于地应力的分布状态具有重要影响,蠕变的发生是由于应力差的存在,蠕变倾向于使地应力各向同性分布^[20],线弹性模型计算得到的地应力存在较大误差,非线性粘弹塑性本构模型能更好地模拟岩石蠕变的实际曲线,使得地应力计算结果更准确^[1]。

3.4 对储层可改造性、支撑剂和施工参数优选的影响

页岩气储层可改造性与储层的脆性、各向异性和天然裂缝发育有关,在对储层进行压裂改造时,也应考虑蠕变的影响。脆性岩石具有较低的粘土含量、较高的弹性模量,同时也具有较差的蠕变性能,脆性页岩不但易于改造,还易于保持裂缝导流能力。

在页岩气储层压裂支撑剂选型及铺设方式上须考虑蠕变的影响。页岩气储层裂缝缝面的蠕变性会增大支撑剂的嵌入,为了减小支撑剂嵌入的影响,应选择粒径较大的支撑剂,其硬度尽可能与页岩基质硬度相匹配,同时在技术水平允许的条件下尽可能地增大支撑剂支撑裂缝的范围,以增强裂缝导流能力^[21-22]。

为了提高压裂的成功率,获得较复杂的人工裂缝网络,特别是天然自支撑裂缝的导流能力,须研

究施工排量、裂缝宽度、支撑剂粒径、压裂液粘度和砂比等参数对裂缝内支撑剂沉降和运移规律的影响,以获得最优方案,降低压裂风险^[23]。采用适当的压裂液体系(如滑溜水),合理布设射孔,适当增大施工排量,使天然裂缝获得较大的剪切应力和滑移错位,形成较大的裂缝宽度,从而延长裂缝闭合蠕变的时间,提高裂缝长期导流能力。

3.5 对生产方式选择的影响

少部分页岩气以游离气的形式存在于孔隙和裂缝中,还有相当大的一部分吸附在页岩基质的有机质中,而控制吸附气解吸的关键因素就是压差。因此,现在多数的页岩气井都尽可能地将生产压差调到最大,从而提高吸附气的解吸附速率。但是,页岩气储层的蠕变性随着生产压差的增大而增大,裂缝导流能力降低的速率也会变大。从蠕变角度来看,尽可能地增大生产压差不一定是最合理的生产方式,应优化压裂后返排方案,以合理的生产压差进行开采,提高气井产能和最终采收率。

4 结论

页岩气储层渗透率极低,必须经过压裂改造才能形成有效产能,天然裂缝剪切滑移生成的大量狭小自支撑裂缝在天然气解析及流动中起着重要作用。页岩气储层具有一定的蠕变性,其中裂缝蠕变占主要部分,其蠕变性随粘土含量的增加而增强,压裂改造后储层蠕变速率将大幅度提高。页岩气储层生产周期长,人工裂缝导流能力对裂缝变形极其敏感,页岩气储层的蠕变对裂缝导流能力具有不可忽视的影响。裂缝闭合蠕变速率与裂缝界面之间、裂缝界面与支撑剂间的相互作用有关,并与基质蠕变速率成正比。压裂改造形成的裂缝网络越发育、单裂缝宽度越小,蠕变对裂缝导流能力的影响越大。在页岩气井数值模拟中,应考虑裂缝的蠕变形变,裂缝闭合蠕变将降低气井产能。同时,页岩气储层地应力计算、支撑剂类型与施工参数优选中也应考虑蠕变的影响,保持流体压力有利于维持裂缝导流能力,提高气井产能和采收率。

参考文献:

- [1] 马珂,宛新林,贾伟风,等.岩石蠕变模型进展及若干问题探讨[J].中国煤炭地质,2011,23(10):43-47.
- [2] 周祖辉,黄荣樽,汪锦江.大庆泥岩的三轴蠕变试验研究[J].华东石油学院学报:自然科学版,1985,9(4):22-30.
- [3] 黄荣樽,周祖辉,张克勤.利用盐岩的单轴高温蠕变试验确定石油钻井的合理泥浆密度[C]//中国岩石力学与工程学会高温高压岩石力学专业委员会.第1届高温高压岩石力学学术讨论会论文集.北京:学术期刊出版社,1986.
- [4] 邓金根,黄荣樽.200 MPa,200 °C高温高压三轴岩石蠕变仪的研制[J].岩石力学与工程学报,1993,12(1):63-69.
- [5] 葛忠伟,樊莉.页岩气研究中应注意的问题[J].油气地质与采收率,2013,20(6):19-22.
- [6] 任闾燕,姜汉桥,李爱山,等.非常规天然气增产改造技术研究进展及其发展方向[J].油气地质与采收率,2013,20(2):103-107.
- [7] Sone H, Zoback M D. Strength, creep and frictional properties of gas shale reservoir rocks [R]. The 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT, June 27-30, 2010.
- [8] 刘向君,刘战君,李允,等.裂缝闭合规律研究及其对油气田开发的影响[J].天然气工业,2004,24(7):39-41.
- [9] 朱贺.泥岩裂缝性储层闭合压力及应力敏感性研究[D].大庆:东北石油大学,2012.
- [10] 杨满平,王正茂,李治平.影响变形介质气藏储层渗透率变化的主要因素[J].天然气地球科学,2003,14(5):386-388.
- [11] Sone H, Zoback M D. Visco-plastic properties of shale gas reservoir rocks [R]. The 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, June 26-29, 2011.
- [12] 吴奇,胥云,王腾飞,等.增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论[J].天然气工业,2011,31(4):7-12.
- [13] Britt L K, Schoeffler Jerry. The geomechanics of a shale play: what makes a shale prospective [R]. SPE 125525, 2009.
- [14] 王小琼.脆性岩石裂纹损伤及物理性质演化的实验研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2012.
- [15] Clarkson C R, Jensen J L. Reservoir engineering for unconventional gas reservoirs: what do we have to consider? [R]. SPE 145080, 2011.
- [16] Reese J L. Stimulating gas production from hydraulic fracture networks: a case study of the Barnett Shale [D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2007.
- [17] Rubin Barry. Accurate simulation of non-Darcy flow in stimulated fractured shale reservoirs [R]. SPE 132093, 2010.
- [18] Blasingame T A. The characteristic flow behavior of low-permeability reservoir systems [R]. SPE 114168, 2008.
- [19] 彭凯,宁正福,王桂丽.页岩气藏双重介质渗流模型研究[J].重庆科技学院学报,2012,14(1):8-11.
- [20] Sone H. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs [D]. Stanford, CA: Stanford University, 2012.
- [21] 温庆志,张士诚,王雷,等.支撑剂嵌入对裂缝长期导流能力的影响研究[J].天然气工业,2005,25(5):65-68.
- [22] 温庆志,张士诚,李林地,等.低渗透油藏支撑裂缝长期导流能力实验研究[J].油气地质与采收率,2006,13(2):98-100.
- [23] 温庆志,翟恒立,罗明良,等.页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):104-107.