

基于应力敏感性的视均质火山岩气藏试井模型

贾永禄¹ 孙高飞¹ 聂仁仕¹ 黄小云² 刘 浩¹

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500;
2. 中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司, 黑龙江 大庆 163412

摘 要:中国含油气盆地中火山岩气藏资源丰富,勘探潜力大。火山岩储层分布范围广、基质物性差、渗透率低,后期改造作用强。由于气体流动过程中存在应力敏感性,因此常规试井模型误差较大。针对这一问题,考虑到模型存在很强的非线性,建立了基于应力敏感性视均质火山岩气藏不稳定试井模型,并重新定义部分参数,通过摄动变换技术、拉普拉斯变换、Stehfest 数值反演等方法对模型求解。推导了无穷大边界、封闭边界下模型的半解析解,获得试井图版,在此基础上进一步研究了变形介质渗透率模量等参数对压力动态曲线的影响。研究表明,基于应力敏感性的试井曲线中压力和压力导数曲线均上翘,压力导数曲线在 0.5 线之上;封闭边界和应力敏感性都会引起曲线抬升;气藏储层应力敏感的存在使气藏压力降落不稳,产量递减趋快,单井控制程度有限,因此在气藏开采过程中采用水平井压裂改造十分必要,同时应保持气藏内部原始压力以利于气井稳产和延长开采时间。

关键词:火山岩气藏;应力敏感;视均质;试井模型;特征

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.04.008

0 前言

火山岩储层受火山喷发作用控制,埋藏深、温度高、岩性复杂。部分火山岩储层发育的气孔、裂缝以及微缝被严重充填并压实,造成储层致密、物性差,试井资料呈现出视均质特征。易晓忠等人^[1]通过对克拉美丽火山岩气藏滴西 18 井区、14 井区 15 井次试井资料研究发现,其中 6 井次呈均质曲线特征、5 井次呈均质-多重复合模型曲线特征、3 井次呈双孔模型曲线特征、1 井次呈垂直裂缝模型曲线特征,含有均质曲线特征的井次占 73%;李海科等人^[2]通过对庆深气田火山岩气藏 200 多层次试井资料统计,同样从中划分出大量均质特征试井曲线。已有研究表明,火山岩气藏储层敏感性矿物含量较少,应力敏感性是渗透率变化的主要因素^[3];霍凌婧^[4]通过对火山岩气藏复杂渗流机理研究发现,相同渗透率的火山岩比低渗砂岩的应力敏感性弱,但是应力敏

感性应予以考虑;薛定谔^[5]、Gladkov S O^[6]指出在气藏开采过程中,气体渗流与岩石变形之间具有很强的耦合效应。因此基于应力敏感性视均质火山岩气藏不稳定试井模型的研究很有意义。根据火山岩气藏的储渗模式和现场试井资料,建立了基于应力敏感性的视均质火山岩气藏试井物理和数学模型,分析了应力敏感性对试井曲线的影响规律。

1 物理模型和数学模型

1.1 物理模型

应力敏感性是指岩石骨架所受有效应力的改变而引起岩石渗透率的变化程度^[3]。Fatt I^[7]、戈尔布诺夫^[8]指出岩石的孔隙度受压力变化的影响很小,其变化可忽略,而渗透率受到的影响不可忽略。本文研究的火山岩气藏中裂缝被碎屑物质或者化学物质充填并压实,这种

收稿日期:2015-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304164);高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20135121120001)

作者简介:贾永禄(1948-),男,四川南充人,教授,博士生导师,学士,从事油气渗流理论和油气藏工程科研工作。

裂缝对应力的敏感性与基质基本一致,实际上,被碎屑物充填了的裂缝已经不是真正意义上的裂缝,而是具有裂缝形态的(微型)基质岩石层^[9]。

视均质火山岩储层既是储集空间又是渗流通道,其物理模型的假设条件为:1)储层为等厚无穷大或圆形封闭地层,忽略应力敏感性引起储层厚度的变化;2)视均质介质中的流体为单相可压缩气体,流动服从等温达西渗流;3)忽略重力和毛细管力的影响;4)气井贯穿整个储层并以恒定产量 q 生产;5)考虑岩石渗透率应力敏感性的影响。

1.2 数学模型

岩石变形后的渗透率 k 与初始渗透率 k_i 满足:

$$k(p) = k_i e^{-\gamma^*(\psi_i - \psi)} \quad (1)$$

引入拟体积系数:

$$B_p = \frac{2p}{\mu Z} B_g \quad (2)$$

火山岩气藏气体扩散方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \gamma^* \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 \\ &= \frac{1}{3.6 \times 10^{-3}} \frac{\phi_i \mu C_i}{k_i} e^{\gamma^*(\psi_i - \psi)} \frac{\partial \psi(p)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: k 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; p 为气藏压力,MPa; B_p 为拟体积系数,无因次; B_g 为气体体积系数,无因次; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; Z 为气体偏差因子,无因次; ψ 为真实气体拟压力, $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; γ^* 为拟渗透率模量, $(\text{mPa} \cdot \text{s}) / \text{MPa}^2$; ϕ_i 为孔隙度,无因次; C_i 为储层综合压缩系数, $1 / \text{MPa}$;下标 i 表示原始状态。

将式(3)无因次化,再结合初始条件和内外边界条件,组成应力敏感性火山岩视均质气藏定产量生产下的不稳定试井数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \psi_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} - \gamma_D^* \left(\frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right)^2 = e^{\gamma_D^* \psi_D} \frac{\partial \psi_D}{\partial t_D} \\ \psi_D(r_D, 0) = 0 \\ C_D \frac{d\psi_D}{dt_D} - \left(e^{-\gamma_D^* \psi_D} r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \\ \psi_D = \left[\psi_D - S \cdot e^{-\gamma_D^* \psi_D} r_D \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \psi_D(r_D, t_D) = 0 \quad (\text{无穷大边界}) \\ \left. \frac{\partial \psi_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (\text{圆形封闭边界}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:无因次距离 $r_D = \frac{r}{r_w}$;无因次时间 $t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} k_i}{\phi_i \mu C_i r_w^2} t$;

无因次井筒储集系数 $C_D = \frac{C}{2\pi \phi_i C_i h r_w^2}$;无因次拟渗透率

模量 $\gamma_D^* = \frac{q_{sc} T_{\text{气层}}}{0.07849 k_i h} \gamma^*$;无因次拟压力 $\psi_D = \frac{0.07849 k_i h}{q_{sc} T_{\text{气层}}} \Delta \psi$ 。 r 为径向圆柱坐标,m; r_w 为井筒半径,

m; r_e 外边界距离,m; h 为储层厚度,m; t 为时间,h; S 为表皮系数,无因次; C 为井筒储集系数, m^3 / MPa ; $T_{\text{气层}}$ 为气层温度,K; q_{sc} 为标准状态下气井产量, $10^4 \text{ m}^3 / \text{d}$;下标 D 表示无因次。

2 模型求解

扩散方程(3)非线性,采用 Pedrosa 变换化简方程^[10]:

$$\psi_D = -\frac{1}{\gamma_D^*} \ln [1 - \gamma_D^* \eta_D(r_D, t_D)] \quad (5)$$

应用摄动技术(Perturbation Technique)变换式,取零阶摄动解:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \eta_{0D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} = \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial t_D} \\ \eta_{0D}(r_D, 0) = 0 \\ C_D \frac{d\eta_{0D}}{dt_D} - \left(r_D \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \\ \eta_{0D} = \left[\eta_{0D} - S \cdot r_D \left(\frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right) \right]_{r_D=1} \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \eta_{0D}(r_D, t_D) = 0 \quad (\text{无穷大边界}) \\ \left. \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (\text{圆形封闭}) \end{cases} \quad (6)$$

对方程组(6)作 $t_D \rightarrow u$ 的拉普拉斯变换,根据虚宗量的贝塞尔函数的性质可得:

无穷大外边界条件下的拉式空间解:

$$\eta_{0wD} = \frac{K_0(\sqrt{u}) + S \sqrt{u} K_1(\sqrt{u})}{u [\sqrt{u} K_1(\sqrt{u}) + C_D u (K_0(\sqrt{u}) + S \sqrt{u} K_1(\sqrt{u}))]} \quad (7)$$

圆形封闭外边界条件下的拉式空间解:

$$\eta_{0wD} = \frac{K_1(\sqrt{u} r_{eD}) [I_0(\sqrt{u}) - S \sqrt{u} I_1(\sqrt{u})] + I_1(\sqrt{u} r_{eD}) [K_0(\sqrt{u}) + S \sqrt{u} K_1(\sqrt{u})]}{u \{ I_1(\sqrt{u} r_{eD}) [C_D u K_0(\sqrt{u}) + (1 + C_D S u) \sqrt{u} K_1(\sqrt{u})] + K_1(\sqrt{u} r_{eD}) [C_D u I_0(\sqrt{u}) - (1 + C_D S u) \sqrt{u} I_1(\sqrt{u})] \}} \quad (8)$$

式中: I_0 、 I_1 分别为0阶与1阶第一类虚宗量贝塞尔函数; K_0 、 K_1 分别为0阶与1阶第二类虚宗量贝塞尔函数。

对式(7)~(8)通过 Stehfest 数值反演^[11],并代入 Pedrosa 变换函数得井底无因次拟压力:

$$\psi_{wD} = -\frac{1}{\gamma_D^*} \ln [1 - \gamma_D^* S^{-1}(\overline{\eta_{0wD}})] \quad (9)$$

式中: S^{-1} 为 Stehfest 数值逆变换。

3 试井曲线特征分析

3.1 应力敏感对无穷大边界影响

绘制出不同无因次渗透率模量情况下的无穷大边界试井曲线,见图1。首先,当 $\gamma_D^* = 0$ 时,即不考虑应力敏感性,压力导数曲线在0.5线处;当 $\gamma_D^* \neq 0$ 时,即考虑应力敏感性,随着 γ_D^* 的增大(应力敏感性趋强),无穷大边界试井曲线向上抬升而且抬升幅度逐步增大,压力导数曲线位于0.5线上方,压力曲线也上翘。

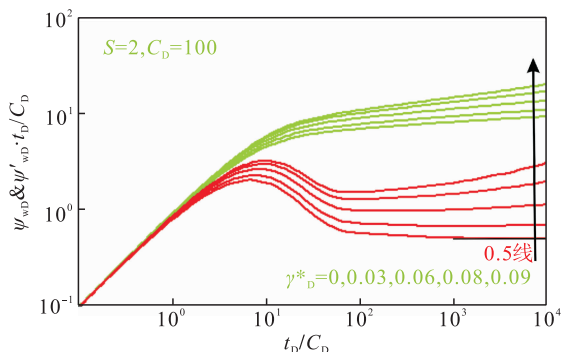


图1 无穷大外边界下应力敏感气藏试井曲线

3.2 应力敏感对圆形封闭边界影响

绘制出不同无因次渗透率模量情况下的封闭边界试井曲线,见图2。首先,当 $\gamma_D^* = 0$ 时,试井曲线出现0.5线,然后在后期上翘,这是封闭边界的响应特征;当 $\gamma_D^* \neq 0$ 时,随着 γ_D^* 的增大,封闭边界试井曲线向上抬升而且抬升幅度逐步增大,此与无穷大边界试井曲线一致。

值得注意的是,现场试井解释中,用封闭边界模型去拟合应力敏感性引起的上翘曲线,会出现错误,如果再用错误封闭边界半径等数据去计算单井控制储量等指标,结果误差很大。

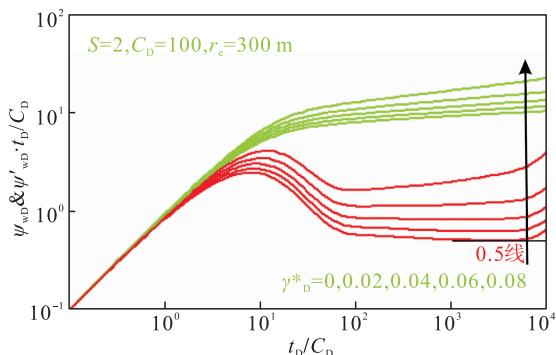


图2 圆形封闭外边界下应力敏感气藏试井曲线

3.3 封闭边界对应力敏感影响

不计试井曲线早期纯井储阶段,当取 $\gamma_D^* = 0.03$,试井曲线比常规试井曲线整体偏高。再分别取封闭边界距离为300、500、700 m,压力导数曲线上翘时间逐步偏后,此与常规试井曲线封闭边界响应特征一致,见图3。

火山岩气藏储层渗透率应力敏感作用的存在使得气藏压力降落不稳,产量递减加快,因此在气藏开发中采用水平井压裂改造十分必要^[12]。

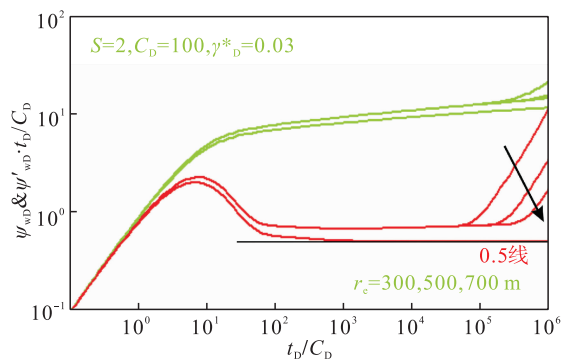


图3 圆形封闭外边界对应力敏感性气藏试井曲线的影响

4 结论

1) 火山岩气藏气体与岩石变形之间的耦合关系模型能很好解释应力敏感性气藏的渗流理论。通过基于应力敏感性试井模型对原来试井模型的修正,可对火山岩应力敏感性气藏进行较准确的试井解释,若不考虑这种应力敏感特性,结果会产生较大偏差。

2) 许多火山岩气藏中的裂缝被碎屑物质或化学物质充填并压实,这种裂缝已经不是真正意义上的裂缝,其试井曲线反映出均质曲线特征,这种视均质火山岩储层介质既是储集空间又是渗流通道。

3) 在现场试井解释中,压力导数曲线上翘,可以是应力敏感性引起的,用封闭边界模型拟合得到的边界距离会偏小。

4) 由于火山岩气藏储层渗透率应力敏感性的作用使得气藏压力下降不稳,产量递减趋快,并且单井控制程度有限,因此在气藏开发中采用水平井压裂改造十分必要,同时应尽量保持气藏内部原始压力以利于气井稳产和延长开采时间。

参考文献:

- [1] 易晓忠,张河,胥青,等. 克拉美丽气田火山岩气藏试井分析及应用[J]. 新疆石油天然气,2010,6(3):37-42.
Yi Xiaozhong, Zhang He, Xu Qing, et al. Analyses of Kelameili Gas Field Lava Reservoir Well Test and Its Application [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2010, 6(3): 37-42.
- [2] 李海科,黄小云,蒋凯军. 庆深气田火山岩气藏试井曲线特

- [3] 刘之的,苗福全,罗晓芳,等. 火山岩裂缝型储层应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学,2012,23(2):208-212.
- [4] 霍凌婧. 火山岩气藏复杂渗流机理研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所),2009.
- [5] 薛定谔. 多孔介质中的渗流物理[M]. 王鸿勋,译. 北京:石油工业出版社,1982:26-33.
- [6] Gladkov S O. Gas-kinetic Model of Heat Conduction of Heterogeneous Substances [J]. Technical Physics,2008,53(7):828-832.
- [7] Fatt I. Pore Volume Compressibilities of Sandstone Reservoirs
- [8] 戈尔布诺夫. 异常油田开发[M]. 张树宝,译. 北京:石油工业出版社,1987:6-14.
- [9] 李传亮. 裂缝性油藏的应力敏感性及产能特征[J]. 新疆石油地质,2008,29(1):72-75.
- [10] Pedrosa O A. Pressure Transient Response in Stress-sensitive Formations[C]//Paper 15115 Presented at the SPE California Regional Meeting,2-4 April 1986,Oakland,California,USA. New York:SPE,1986.
- [11] 贾永禄,赵必荣. 拉普拉斯变换及数值反演在试井分析中的应用[J]. 天然气工业,1992,12(1):60-64.
- [12] 郭洋,杨胜来. 我国火山岩油气藏压裂技术研究进展[J]. 天然气与石油,2012,30(2):49-51.



(上接第20页)

- [2] 李 浩.杭甬线输气管道工程防腐专业的设计与施工[J].天然气与石油,2008,26(2):1-3.
Li Hao. Summarization on Design and Construction of Corrosion Control System in Hang—Yong Gas Pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26(2): 1-3.
- [3] 张 伟,蔡青青,张 勇,等.钢制管道清管经验及清管器卡堵的应急处理[J].天然气与石油,2010,28(6):14-16.
Zhang Wei, Cai Qingqing, Zhang Yong, et al. Steel Pipeline Pigging Experience and Emergency Treatment in Pig Blocking [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(6): 14-16.
- [4] 陈 杰,杨 华,沈选忠,等.输气管道大中型河流穿越设计要点[J].天然气与石油,2007,25(3):4-7.
Chen Jie, Yang Hua, Shen Xuanzhong, et al. Description of Large and Middle River Crossing Options and Design Outline [J]. Natural Gas and Oil, 2007, 25(3): 4-7.
- [5] 曾 强,陈彬源,刘海禄,等.浅谈定向钻穿越中管道外防腐层的保护[J].天然气与石油,2008,26(4):24-26.
Zeng Qiang, Chen Binyuan, Liu Hailu, et al. Protection of Anticorrosive Coating in Gas Pipeline during Directional Drilling Crossing[J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26(4): 24-26.
- [6] 地质学会非开挖技术专业委员会.2013年非开挖技术会议论文集.2013年非开挖技术会议,2013-04-19,苏州,中国.北京:中国地质学会非开挖技术专业委员会,2013.
- [7] 侯学瑞.洛阳驻马店成品油管道黄河定向钻穿越技术[J].天然气与石油,2010,28(1):1-3.
Hou Xuerui. Luoyang-Zhumadian Oil Product Pipeline Crossing Yellow River by Horizontal Directional Drilling[J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(1): 1-3.
- [8] GB 50423-2013,油气输送管道穿越工程设计规范[S].
GB 50423-2013, Code for Design of Oil and Gas Transportation Pipeline Crossing Engineering[S].
- [9] GB 50369-2014,油气长输管道工程施工及验收规范[S].
GB 50369-2014, Code for Construction and Acceptance of Oil & Gas Transmission Pipeline Engineering[S].