

# 基于 V 型河道边界的煤层气井压力动态响应分析

暴喜涛<sup>1,2</sup>, 闫怡飞<sup>2</sup>, 杨江<sup>1</sup>, 闫相祯<sup>2</sup>, 李顺初<sup>3</sup>

1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580

2. 中国石油大学油气 CAE 研究中心 山东青岛 266580

3. 西华大学应用数学研究所 四川成都 610039

通讯作者: Email: yanyf163@ 163.com

项目支持: 国家自然科学基金项目“基于 Euler 流固耦合模型的储气库井注采管柱气流激励震动机理及动力响应研究”(51804330)、国家科技重大专项“高含硫气井完整性评价与安全管控技术”(2016ZX05017-003)、中央高校基本科研业务费专项“储气库水平井注采管柱振动机理及安全分析”(18CX02154A)

引用: 暴喜涛, 闫怡飞, 杨江, 等. 基于 V 型河道边界的煤层气井压力动态响应分析[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 1-7.

Cite: BAO Xitao, YAN Yifei, YANG Jiang, et al. Dynamic pressure response analysis of coalbed methane well based on V-type channel boundary [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 1-7.

**摘要** 为研究 V 型河道边界对煤层气井压力动态响应的影响, 利用相似构造法, 解出无穷大外边界条件下的煤层气渗流模型的解; 根据镜像反映原理, 得到煤层气井在 V 型河道边界的镜像解; 利用叠加原理, 得到煤层气井在 V 型河道外边界条件下的解。利用 Stehfest 数值反演对模型解进行数值反演, 绘制出双对数、半对数、一阶压力导数 (PPD) 及二阶对数压力导数 (SLPD) 四种试井分析曲线, 分析 V 型河道外边界参数对煤层气井井底压力动态响应的影响规律。结果表明, 随着 V 型河道角度的增大, 双对数曲线、PPD 曲线和 SLPD 曲线的“V”字型响应特征的强度减弱, 四种试井分析曲线边界响应发生位置向后推移; 随着距河道夹角顶点距离的增加, 四种试井分析曲线边界响应发生位置向后推移, 形态不发生变化。实例应用证明, 该模型以及试井分析曲线能够解释具有河道边界的煤层气井, 解释数据合理。

**关键词** 煤层气; 试井模型; 河道边界; 相似构造法; 试井分析曲线

中图分类号: TE353 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.001

## Dynamic pressure response analysis of coalbed methane well based on V-type channel boundary

BAO Xitao<sup>1,2</sup>, YAN Yifei<sup>2\*</sup>, YANG Jiang<sup>1</sup>, YAN Xiangzhen<sup>2</sup>, LI Shunchu<sup>3</sup>

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Oil and Gas CAE Technology Research Center, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

3. Institute of Applied Mathematics, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China

**Abstract:** In order to investigate the effects of V-type channel boundary on the dynamic pressure response of coalbed methane well, the similar structure method was used to solve the coalbed methane flow model with infinite outer boundary condition. The image solution of coalbed methane well in the V-type channel boundary was gained according to the Image Principle, while the solution of coalbed methane well with the outer boundary of V-type channel was obtained using the superposition principle. The Stehfest numerical inversion was adopted to inverse the model solution, and four well test analysis curves were drawn, including log-log, semi-log, PPD and SLPD. The dynamic pressure response patterns of coalbed methane well were analyzed under various outer V-type channel boundary parameters. Result indicates that the V-type response intensity of log-log, PPD and SLPD curves decreases with the increase of V-type channel included angle. The boundary response positions shift backward for the four well test analysis curves. The boundary response positions shift backward for the four well test analysis curves without shape change with the increase of the distance from the vertex of channel included angle. Field application proves that this model and well test analysis curves could provide a reasonable interpretation for the coalbed methane well with channel boundary.

**Keywords:** coalbed methane; well test model; channel boundary; similar structure method; well test analysis curve

煤层气开采可以改善能源结构、减轻生态环境 压力, 近年来煤层气开发一直是各种能源开发中的

热点<sup>[1-2]</sup>。对于煤层气的研究,Pavone A.等<sup>[3]</sup>最早提出了平衡吸附模型。在此基础上,Bumb A. C.等<sup>[4]</sup>建立了煤层气渗流模型,并绘制了早期的煤层气试井分析曲线。Kolesar J. E.等<sup>[5]</sup>进一步提出了煤层气新的动态模型——非平衡吸附模型,有效地对平衡吸附模型进行了补充和完善。在此基础上,孔祥言<sup>[6]</sup>构建了考虑井筒储集效应和表皮效应且具有无穷大外边界、圆形外边界条件下煤层气渗流模型。王磊<sup>[7]</sup>研究了基于圆形封闭外边界下的具有分形特征的煤层气井渗流模型,并绘制了相应的双对数分析曲线。在煤层气渗流模型的基础上,文献进一步构建了基于变产量生产下的煤层气井的渗流模型,并引入相似构造法对模型进行了求解,简化了模型求解的过程<sup>[8-9]</sup>。另外,鉴于水流通会对附近的油气井产生能量供给的作用,利用油气井的试井测试资料也可以对供给边界进行描述。Abbaszadeh M.等<sup>[10]</sup>对于均质油藏中具有导流断层边界(供给边界)的压力动态响应,以及双线性流动特征进行了研究。Trabelsi R.等<sup>[11]</sup>研究了一口生产井位于一条封闭断层边界和一个直线定压边界之间的油藏模型,分析了生产井与两类型边界的距离对无因次压力以及无因次压力对时间的变化率的影响规律。宋付权等<sup>[12]</sup>研究了油藏中具有一条直线供给边界的水平井的试井分析模型,绘制了典型的试井分析曲线,分析了直线供给边界参数与水平井底压力动态响应的影响规律。董晓芳<sup>[13]</sup>构建了油水两相聚合物驱渗流模型,利用数值试井的方法对模型进行了求解,并解释了两口实例井,利用双对数曲线、压力史曲线、所有生产井含水率曲线,以及聚合物浓度曲线同时进行拟合,分析了储层中的优势水流通通道以及注采井间的连通情况。而利用试井分析的方法研究在煤层气储层中的V型河道边界,需要进一步的研究。同时,在试井分析曲线中,不同的曲线特征也可以用来分析井况、储层特征、流体的相态等问题。田新建等<sup>[14]</sup>分析了压降分析中的压力骤升、压恢分析中的压力骤降、压恢速率前后不一致,以及压恢曲线形态变化特征下的设备工况变化、流体相态变化等现象。孙达<sup>[15]</sup>在利用双对数曲线进行试井解释的同时,结合了辅助导数曲线(一阶压力导数曲线),而一阶压力导数(PPD)曲线和二阶对数压力导数(SLPD)曲线可以有效地分析流体在井筒中储集流体相态转化等问题<sup>[16-17]</sup>。本文将PPD曲线和SLPD曲线推广到河道边界特

征的诊断中,从而可以利用一阶压力导数和二阶压力导数的数据敏感性降低试井解释模型选择的难度,同时也可以用来诊断和分析河道边界的影响,达到提高试井工程师工作效率的目的。

## 1 V型河道边界条件下煤层气试井分析模型

首先,利用相似构造法<sup>[8-9]</sup>对无穷大边界的煤层气渗流模型<sup>[6]</sup>进行求解,可得到Laplace空间中具有相似连分式结构的解式,即

$$\bar{u}(r_D, z) = -\frac{1}{z} \times \frac{1}{C_D z + \frac{1}{1 + C_D z S - \phi(1, z)}} \times \frac{1}{1 + C_D z S - \phi(1, z)} \times \phi(r_D, z) \quad (1)$$

式中: $C_D$ 为无因次井筒储集系数; $z$ 为Laplace空间变量; $S$ 为表皮因子,无因次; $\phi(r_D, z)$ 为相似核函数。

当 $r_D = 1$ 时,可得无因次井底压力在Laplace空间中的表达式,即

$$\bar{u}_{wo}(z) = -\frac{1}{z} \times \frac{1}{C_D z + \frac{1}{1 + C_D z S - \phi(1, z)}} \times \frac{\phi(1, z)}{1 + C_D z S - \phi(1, z)} \quad (2)$$

其中,相似核函数为

$$\phi(r_D, z) = \frac{K_0(\sqrt{f(z)} r_D)}{\sqrt{f(z)} K_1(\sqrt{f(z)})} \quad (3)$$

基质系统的拟稳态扩散:

$$f(z) \big|_{\text{拟稳态}} = \left[ \omega + \frac{\alpha(1 - \omega)}{z\lambda + 1} \right] \times z \quad (4)$$

基质系统的非稳态扩散:

$$f(z) \big|_{\text{非稳态}} = \omega z + \frac{1 - \omega}{\lambda} \alpha [\sqrt{\lambda z} \operatorname{cth}(\sqrt{\lambda z}) - 1] \quad (5)$$

拟压力变换:

$$m = \frac{\mu_i Z_i}{p_i} \int \frac{p}{\mu Z} dp$$

定义无量纲参数:

$$m_D = \frac{542.867 Kh(m_i - m)}{q_{sc} \mu_i}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$

$$t_D = \frac{1.013Kt}{10^{-4}\Lambda r_w^2}$$

$$C_D = \frac{C}{6.283\phi C_i h r_w^2}$$

$$\omega = \frac{0.10325\phi\mu C_g}{\Lambda}$$

$$\alpha = 1.818 \times 10^4 \frac{q_{sc}\mu_i V_L m_L}{Kh(m_L + m)(m_L + m_{ic})}$$

$$\lambda = \frac{1.01325K}{\Lambda}$$

$$\text{其中 } \Lambda = 0.101\phi\mu C_g + \frac{55.006KhTZ_i p_{sc}}{q_{sc} T_{sc} p_i}$$

式中:  $C$  为井筒储集系数,  $\text{m}^3/\text{MPa}$ ;  $C_i$  为综合压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $r$  为渗流半径,  $\text{m}$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为时间,  $\text{h}$ ;  $V$  为气体体积,  $\text{m}^3$ ;  $p_{sc}$  为原始地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_{sc}$  为原始温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K_0, K_1$  分别为 0 阶和 1 阶变型 Bessel 函数;  $r_D$  为无因次渗流半径;  $a$  为吸附因子, 无因次;  $\omega$  为储容比, 无因次;  $\lambda$  为窜流系数, 无因次;  $\phi$  为孔隙度, 小数;  $\mu$  为基质系统气体的黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $C_g$  为气体的压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $q_{sc}$  为煤层气产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $K$  为渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $h$  为产层的厚度,  $\text{m}$ ;  $m$  为拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $m_{ic}$  为原始地层拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;  $V_L$  为上限体积,  $\text{m}^3$ ;  $Z$  为气体超压压缩因子, 无因次;  $p$  为煤层中任意点压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_i$  为原始煤层压力,  $\text{MPa}$ ; 下标  $i$  表示基质系统; 下标  $D$  表示无因次; 下标  $w$  表示井底。

Laplace 变换:

$$\bar{m}_D(r_D, z) = \int_0^\infty e^{-zt_D} m_D(r_D, t_D) dt_D$$

假定煤层气井位于 V 型河道夹角的角平分线上, 基于一条直线供给边界的煤层气井的镜像反映模型<sup>[18]</sup>, 可得到夹角分别为  $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  的模型及其镜像模型, 分别为

$$\bar{u}_{wb}|_{\theta=30^{\circ}} = \sum_{j=1}^{11} \left\{ (-1)^j F_i \left[ \sin\left(\frac{j\theta}{2}\right) R_D \middle/ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$\bar{u}_{wb}|_{\theta=45^{\circ}} = \sum_{j=1}^7 \left\{ (-1)^j F_i \left[ \sin\left(\frac{j\theta}{2}\right) R_D \middle/ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$\bar{u}_{wb}|_{\theta=60^{\circ}} = \sum_{j=1}^5 \left\{ (-1)^j F_i \left[ \sin\left(\frac{j\theta}{2}\right) R_D \middle/ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$\bar{u}_{wb}|_{\theta=90^{\circ}} = -2F_i[R_D] + F_i[\sqrt{2}R_D] \quad (9)$$

由(6)式~(9)式发现, 当  $\theta$  为  $180^{\circ}$  的整数倍的条件, 煤层气井在 V 型河道边界的镜像解有如下规律:

$$\bar{u}_{wb} = \sum_{j=1}^{2N-1} \left\{ (-1)^j F_i \left[ \sin\left(\frac{j\theta}{2}\right) R_D \middle/ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$\text{其中 } F_i(R_D) = \frac{1}{z} K_0(2\sqrt{f(z)} R_D)$$

$$N = 180/\theta$$

式中:  $\theta$  为角度制。

特别地, 当  $\theta = 180^{\circ}$  时,  $N = 1$ , 则有

$$\bar{u}_{wb} = -F_i(R_D) \quad (11)$$

此时, 为直线供给边界的特殊情况<sup>[14]</sup>。

根据叠加原理<sup>[19]</sup>, 有 Laplace 空间中的无因次井底压力解为

$$\bar{u}_w = \bar{u}_{wo} + \bar{u}_{wb} \quad (12)$$

## 2 河道夹角外边界条件的煤层气渗流模型诊断曲线分析

利用 Sethfest 方法, 对公式(11)进行数值反演<sup>[20]</sup>, 可得实空间中无因次井底压力解, 绘制四种煤层气试井分析曲线: 双对数曲线、半对数曲线、PPD 曲线、SLPD 曲线。本文以角度和距离顶点距离两个参数来分析 V 型河道边界对煤层气井的井底压力的影响规律。

### 2.1 角度对煤层气井压力动态响应的影响

考虑角度的不同对压力响应产生的影响规律, 选择模型参数:  $C_D = 6$ ,  $S = 8$ ,  $\omega = 0.1$ ,  $\alpha = 8$ ,  $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ ,  $R_D = 1000$ ,  $\theta = 30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ , 绘制模型的试井分析曲线如图 1~4 所示。

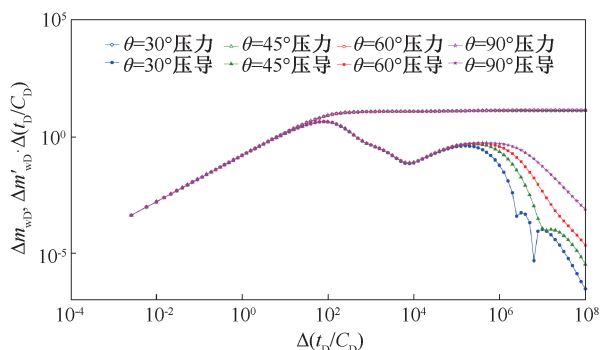


图 1 不同夹角下的 V 型河道边界煤层气井无因次双对数曲线

Fig.1 Dimensionless log-log curve of coalbed methane well with V-type channel boundary under various included angles

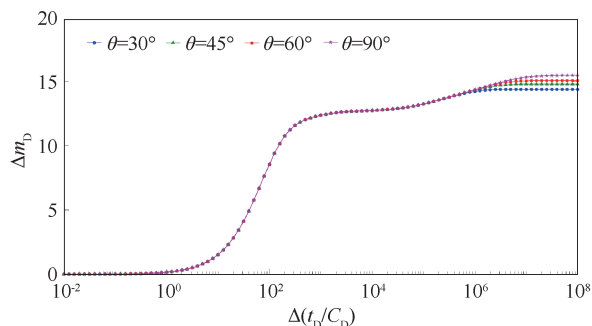


图 2 不同角度下的 V 型河道边界煤层气井无因次半对数曲线

Fig.2 Dimensionless semi-log curve of coalbed methane well with V-type channel boundary under various included angles

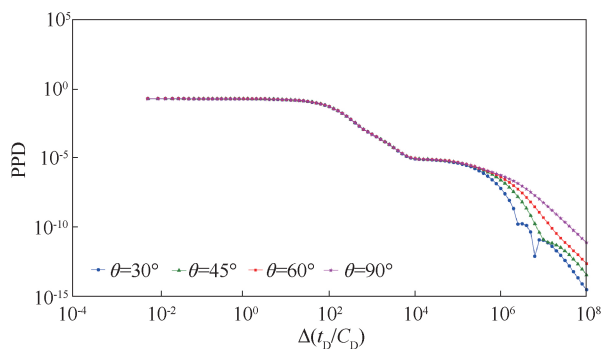


图 3 不同角度下的 V 型河道边界煤层气井无因次 PPD 曲线

Fig.3 Dimensionless PPD curve of coalbed methane well with V-type channel boundary under various included angles

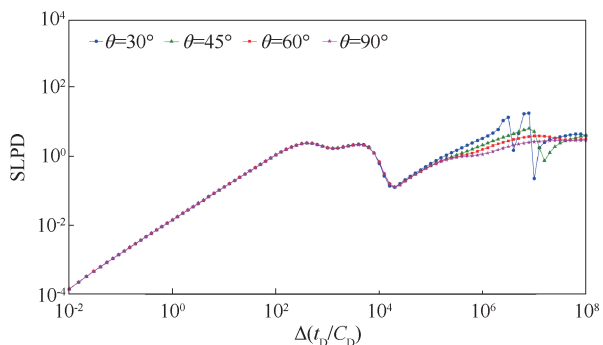


图 4 不同角度下的 V 型河道边界煤层气井无因次 SLPD 曲线

Fig.4 Dimensionless SLPD curve of coalbed methane well with V-type channel boundary under various included angles

在无因次双对数曲线中(图 1),当角度较小时,边界流动段曲线递减的程度较大,且存在陡降后陡升的“V”字型的曲线形态;当角度逐渐增大时,边界流动段曲线递减的程度逐渐减弱,“V”字型发生的位置逐渐向后推移且下尖程度逐渐减弱。另外,随着角度的增加,晚期径向流段也随之延长,无因次压力导数

在边界流动段“下掉”的响应程度也随之减弱。

在无因次半对数曲线中(图 2),无因次压力曲线的响应特征为斜率为 0 的水平段,边界流动段的曲线形态不会随着角度的变化而发生变化。但随着角度的增大,边界流动段的无因次压力逐渐增大,且转变为水平线的位置向后推移。

考虑到数据一阶导数和二阶导数的敏感性更强,将 PPD 曲线和 SLPD 曲线扩展到河道边界分析中来。

在无因次 PPD 曲线中(图 3),无因次 PPD 曲线保持递减的边界响应特征,边界流动段曲线的递减程度随着角度的增大而减小,且当角度逐渐增大时,“V”字型的曲线形态发生的位置逐渐向后推移,且下尖程度逐渐减弱。

在无因次 SLPD 曲线中(图 4),无因次 SLPD 曲线表现为 SLPD 值为  $10^0$  水平直线上方“上翘”形成“凸起”的响应特征,边界段后期下降后又重新开始上升。曲线“上翘”以及形成“凸起”的程度均随着角度的增加而减小。另外,在 SLPD 曲线的边界流动段中,“V”字型的曲线形态发生两次,随着角度的增大,“V”字型曲线形态发生的位置向后推移且下尖程度也随之减弱。另外,随着角度的增加,晚期径向流段与 SLPD 值为  $10^0$  线重合段越长,这也表明晚期径向流段随着角度的增加而延长。

## 2.2 距河道夹角顶点的距离对压力响应的影响

考虑煤层气井距 V 型河道夹角顶点距离的不同对压力响应产生的影响规律,选择模型参数:  $C_D = 6$ ,  $S = 8$ ,  $\omega = 0.1$ ,  $\alpha = 8$ ,  $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $R_D = 600$ 、1 000、1 400、1 800,绘制模型的试井分析曲线如图 5~8 所示。

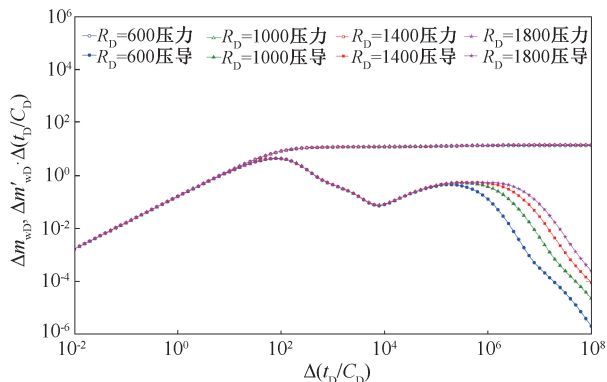


图 5 基于距 V 型河道顶点距离的 V 型河道边界煤层气井无因次双对数曲线

Fig.5 Dimensionless log-log curve of coalbed methane well with V-type channel boundary based on the distance from the vertex of the V-type channel



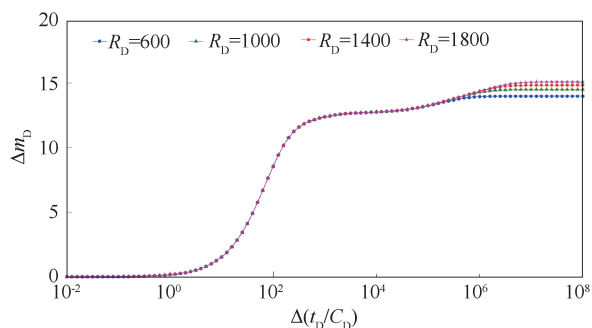


图 6 基于距 V 型河道顶点的距离下的 V 型河道边界煤层气井无因次半对数曲线

Fig.6 Dimensionless semi-log curve of coalbed methane well with V-type channel boundary based on the distance from the vertex of the V-type channel

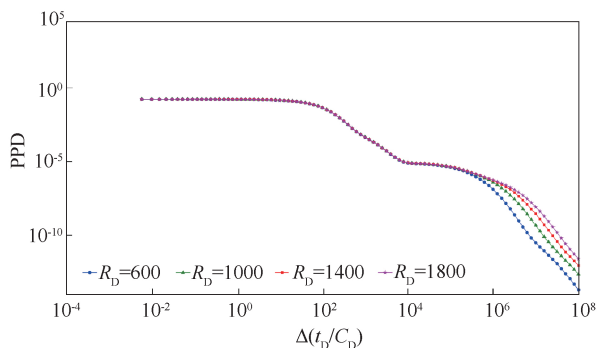


图 7 基于距 V 型河道顶点的距离下的 V 型河道边界煤层气井无因次 PPD 曲线

Fig.7 Dimensionless PPD curve of coalbed methane well with V-type channel boundary based on the distance from the vertex of the V-type channel

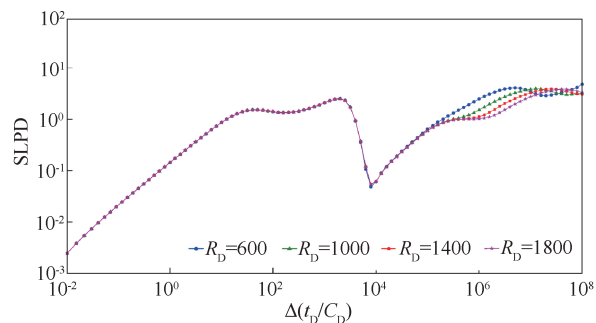


图 8 基于距 V 型河道顶点的距离下的 V 型河道边界煤层气井无因次 SLPD 曲线

Fig.8 Dimensionless SLPD curve of coalbed methane well with V-type channel boundary based on the distance from the vertex of the V-type channel

在无因次双对数曲线中(图 5),随着距顶点距离的增加,晚期径向流段增加,无因次压力导数发生“下掉”的位置越靠后,但曲线“下掉”的形态和幅度不会随着距离的改变而发生变化。

在无因次半对数曲线中(图 6),随着距 V 型

河道顶点距离的增加,无因次井底压力曲线在边界流动段转为水平段的位置越靠后。而且,水平段的无因次井底压力值也随着距离的增加而增大。

在无因次 PPD 曲线中(图 7),随着距 V 型河道顶点距离的增加,无因次压力导数发生递减的位置越向后延迟,并且在相同增幅下,边界流动段的压力导数延迟的幅度随着距顶点的距离的增加逐渐减小。

在无因次 SLPD 曲线中(图 8),随着距 V 型河道顶点距离的增加,SLPD 曲线在边界流动段与 SLPD 值为  $10^0$  的重合段越长,意味着晚期径向流段增加;同时,随着距 V 型河道顶点距离的增加,无因次 SLPD 曲线在边界流动段发生“上翘”、形成“凸起”以及边界段后期恢复上升的位置越靠后,且延迟的幅度随着距 V 型河道顶点距离的增加而减弱。但各项特征的幅度不会随着距离增加而发生变化。这说明,V 型河道边界的流动特征发生的时间随着边界距离的增加向后推移,但推移的幅度随着距 V 型河道顶点距离的增加而减小。

结合四种不同试井分析曲线的形态特征,可以降低试井解释过程中模型的多解性;同时,在拟合的过程中,四种试井分析曲线的约束可以提高解释结果的可靠性。

### 3 实例验证

为了验证和应用本文的研究成果,利用本文的模型和试井分析曲线对中国某煤层气某区块的煤层气井(DE739 井)的实测资料进行试井解释。

DE739 井基本解释参数:井筒半径 0.113 m,产层厚度 5 m,孔隙度 9.7%,地层静压(中深)20.137 MPa,温度 90.325 °C,平均产气量 5 850 m<sup>3</sup>/d;煤层气参数:黏度  $1.795\ 0 \times 10^{-2}$  mPa·s,相对密度 0.589 4,体积系数  $5.905\ 1 \times 10^{-3}$ ,压缩系数  $4.585\ 3 \times 10^{-2}$  MPa<sup>-1</sup>;煤岩压缩系数  $7.141\ 9 \times 10^{-4}$  MPa<sup>-1</sup>,综合压缩系数  $4.656\ 7 \times 10^{-2}$  MPa<sup>-1</sup>。

DE739 井测试压恢分析曲线在早期斜率为 1 并且经过较短的井储段和过渡段后,四种试井分析曲线均表现出煤层气井的试井分析曲线特征(图 9~12),且边界响应满足 60°V 型河道边界的特征。因此,选用“煤层气+60°V 型河道边界”模型对 DE739 井进行解释,四种曲线拟合效果良好。

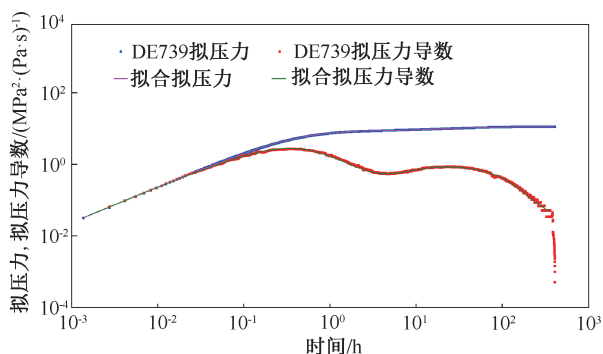


图9 DE739井双对数拟合曲线图  
Fig.9 Log-log fitting curve of Well DE739

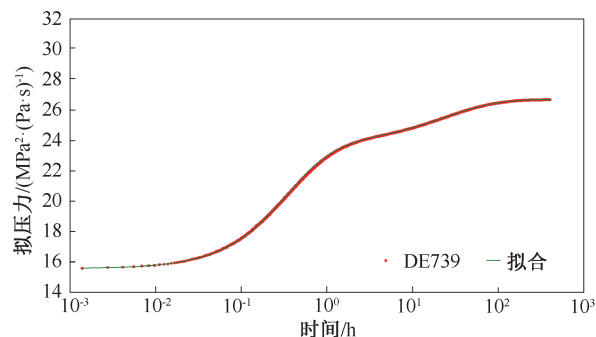


图10 DE739井半对数拟合曲线图  
Fig.10 Semi-log fitting curve of Well DE739

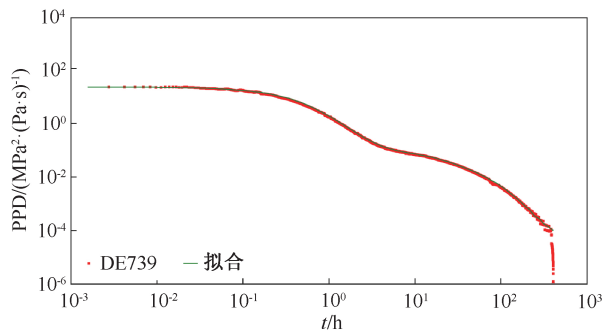


图11 DE739井PPD拟合曲线图  
Fig.11 PPD fitting curve of Well DE739

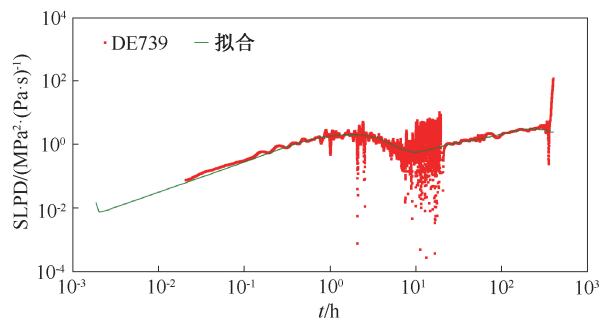


图12 DE739井SLPD拟合曲线图  
Fig.12 SLPD fitting curve of Well DE739

解释得到煤层气产层的渗透率为 34 mD,表皮系数-0.421,井筒储存系数  $0.136 \text{ m}^3/\text{MPa}$ ,弹性

储容比为 0.235,湍流系数为  $1.977 \times 10^{-4}$ ,煤层气井距 V 型河道夹角顶点的距离 79.307 m,这与地震监测资料得出的解释结果 (80.132 m) 基本相符 (图 13)。

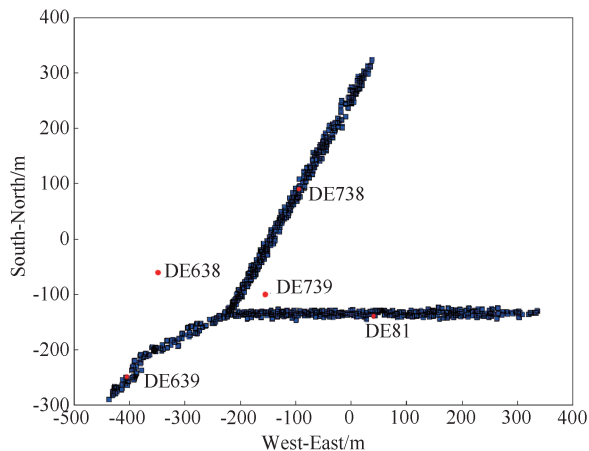


图13 中国煤层气某区块部分地震资料解释结果  
Fig.13 Partial seismic data interpretation of a coalbed methane block in China

## 4 结论

(1) 根据数据一阶导数和二阶导数的敏感性,将 PPD 曲线以及 SLPD 曲线推广到模型诊断以及 V 型河道的识别中,分别分析了基于 V 型河道边界的煤层气井试井模型的双对数曲线、半对数曲线、PPD 曲线,以及 SLPD 曲线在边界流动段的响应特征。

(2) 得到了不同 V 型河道边界参数 (角度和距 V 型河道顶点的距离) 下的煤层气井底压力动态响应规律:晚期径向流段随着角度和距 V 型河道边界顶点距离的增加而延长;当角度较小时,双对数曲线、PPD 曲线和 SLPD 曲线中的“V”字型的曲线的下尖形态特征非常明显且发生位置靠前,随着角度增大,“V”字型曲线的下尖形态的边界流动段响应特征逐渐减弱且发生位置向后延迟;随着距 V 型河道边界顶点距离的增加,四种试井分析曲线边界流动段中 V 型河道边界的流动特征发生的位置向后推移,但相同距离增量下的推移幅度逐渐减弱,但 V 型河道边界的曲线响应特征形态的不会随着距离的变化而发生改变。

(3) 本次研究补充了煤层气渗流理论的外边界模型,提供的四种试井分析曲线可以降低试井工程师对模型判断的难度,并提高试井解释结果的可靠性。

致谢:感谢国家自然科学基金项目“基于 Euler 流固耦合模型的储气库井注采管柱气流激励震动机理及动力响应研

究”(51804330)和国家科技重大专项“高含硫气井完整性评价与安全管控技术”(2016ZX05017-003)联合资助。

## 参考文献

- [1] MOORE T A. Coalbed methane: A review [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 101(6): 36-81.
- [2] QIN Y, MOORE T A, SHEN J, et al. 2018. Resources and geology of coalbed methane in China: A review [J]. *International Geology Review*, 2018, 60(5-6): 777-812.
- [3] PAVONE A, SCHWERER F. Development of coal-gas production simulators and mathematical models for well test strategies [C]. *Final Report*, 1986.
- [4] BUMB A C, MCKEE C R. Gas-well testing in the presence of desorption for coalbed methane and Devonian shale [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3(1): 179-185.
- [5] KOLESAR J E, ERTEKIN T, OBUT S T. The unsteady-state nature of sorption and diffusion phenomena in the micropore structure of coal: Part 1-Theory and mathematical formulation [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1990, 5(1): 81-88.
- [6] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 503-513.
- [7] 王磊. 分形介质煤层气藏产能动态分析[J]. *油气井测试*, 2018, 27(2): 7-13.  
WANG Lei. Production performance analysis for fractal CBM reservoirs [J]. *Well Testing*, 2018, 27(2): 7-13.
- [8] BAO Xitao, YAN Yifei, YANG Jiang, et al. Similar constructive method for solving the model of coal-bed methane flow through coal-bed methane reservoir [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(4): 1783-1798.
- [9] LI S C, ZHANG D, ZHENG P S, et al. Similar structure of solution for triple media shale gas reservoir [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 152(2): 67-80.
- [10] ABBASZADEH M, ASAKAWA K, CINCO-LEY H, et al. Interference testing in reservoirs with conductive faults or fractures [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2000, 3(5): 426-434.
- [11] TRABELSI R, BOUKADI F, SEIBI A, et al. Transient pressure behavior of a well located between a constant pressure boundary and a Sealing Fault [J]. *Natural Resources*, 2017, 8(10): 646-656.
- [12] 宋付权, 刘慈群. 单一直线边界油藏中水平井渗流压力动态分析[J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(4): 47-50.
- SONG Fuqian, LIU Ciqun. The transient pressure analysis of a horizontal well in an unlimited reservoir with a linear boundary [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(4): 47-50.
- [13] 董晓芳. 基于数值试井的聚驱前缘与大通道识别应用案例分析[J]. *油气井测试*, 2018, 27(3): 66-71.  
DONG Xiaofang. Case study for identification of polymer flooding front and large channel based on numerical well testing [J]. *Well Testing*, 2018, 27(3): 66-71.
- [14] 田新建, 廖伟伟, 补璐璐, 等. 利用“异常”试井曲线分析油水井工程问题[J]. *油气井测试*, 2018, 27(4): 67-72.  
TIAN Xinjian, LIAO Weiwei, BU Lulu, et al. Utilizing the “abnormal” well test curve to analyze the engineering problems in oil and water wells [J]. *Well Testing*, 2018, 27(4): 67-72.
- [15] 孙达. 油气井压力恢复试井解释关键技术[J]. *油气井测试*, 2018, 27(6): 73-77.  
SUN Da. Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation [J]. *Well Testing*, 2018, 27(6): 73-77.
- [16] MATTAR L, ZAORAL K. The primary pressure derivative (PPD) a new diagnostic tool in well test interpretation [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1992, 31(4): 63-70.
- [17] QASEM F H, NASHAWI I S, MIR M I. Detection of pressure buildup data dominated by wellbore phase redistribution effects[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2002, 34(1-4): 109-122.
- [18] 姜礼尚, 陈钟祥. 试井分析理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 13-14.
- [19] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 92-120.
- [20] SCHMITTROT, LOUIS A. Numerical inversion of Laplace transforms[J]. *Communications of the ACM*, 1960, 3(3): 171-173.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**暴喜涛,男,1987年出生,博士研究生,中国石油大学(华东)油气田开发工程专业在读博士研究生,主要研究方向为油气田开发工程。电话:0532-86981703; Email:baoxitao@126.com。通信地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学(华东)特种实验楼B221室,邮政编码:266580。