第 13 卷 第 35 期 2013 年 12 月
1671—1815(2013)35-0000-06

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 13 No. 35 Dec. 2013
© 2013 Sci. Tech. Engrg.

石油技术

异常高压气藏开发物理模拟相似理论研究

沈伟军[1,3] 李熙喆[2] 陆家亮[2] 刘晓华[2]

(中国科学院渗流流体力学研究所[1],廊坊 065007;
中国石油勘探开发研究院廊坊分院[2],廊坊 065007;中国科学院大学[3],北京 100049)

摘 要 为了使物理模拟实验结果更好地应用到气田中,为气田开发方案设计提供理论指导,在前人针对水驱油藏研究的基础上,针对异常高压气藏的特点,从气藏气水两相的基本方程出发,应用检验分析方法推导了异常高压气藏开发物理模拟相似准则,分析了各相似准数的物理意义。在此基础上,分析与讨论某实际气田井组原型与模型之间参数换算,从而量化模型与原型的关系。从中可以看出,对于复杂物理问题,要完全满足所有相似准则是很难实现的;所以只能采用部分相似模拟,即在模拟中对主要的无量纲参数进行完全模拟,对次要相似参数进行放松。根据推导相似准则确定的模型与原型的换算关系,可以为异常高压气藏开发物理模拟提供理论依据和设计原则。

关键词 异常高压气藏 物理模拟 相似准数 相似理论

中图法分类号 TE312; **文献标志码** A

异常高压气藏作为一种特殊复杂气藏,主要分布在我国的四川、新疆等地,在已发现的气藏中占有相当大的比例。随着全球能源能源供应的紧张,其重要性日益凸显[1]。而物理模拟是油气藏开发研究的一个重要方法,可以用来研究油气藏流体在岩石中的渗流规律,为油气田开发方案设计提供指导。它的理论基础是相似理论,通过影响油气藏一系列相似准数可以将油气田现场的单井模型按比例缩小转化为实验室的小模型,用来研究各物理量之间的函数关系,从而揭示油气藏开发规律[2,3]。

利用相似理论对油气藏物理模拟研究是从 Leverett 等人[4]开始的。Papoport 等[5]总结了注水开采"成比例的"实验研究结果。Geertsma 等[6]用检查分析法和量纲分析法导出了冷水驱、热水驱和溶剂驱的相似准则;并对可行性进行了讨论。Perkins 等[7]根据两相流动控制方程推导了水驱油的相似参数,通过采用折算饱和度和折算渗透率表示的相渗曲线解决了不同体系中相渗曲线形状差异很大的问题。Khan 等[8]采用模型实验研究异常高压锥进的情况,认为除非把油井的产量控制在经济极限以下,否则是不可能消除异常高压锥进的。根据考虑重力和毛细管力的油、水两相油藏数学模型,田启华等[9]运用方程量纲分析方法,推导了影响厚油层水驱油过程的相似准数。孔祥言等[10]以五点法井网为基础,推导了水驱油物理模拟相似准则;推导过程中忽略重力影响、且假定束缚水和残余油饱和度在全场是均匀分布。白玉湖等[11—14]提出了相似参数的敏感性分析方法,为定量确定水驱油、天然气藏、天然气水合物藏物理模拟主要相似参数及其实现部分相似提供了理论依据和设计原则。但是这些相似理论研究主要针对水驱油藏物理模拟,对气藏开发物理模拟研究的相似理论很少。因此,为了更好地模拟气藏开发,针对异常高压气藏开发的特点,从气藏气水两相基本方程出发,应用检验分析法推导出了异常高压气藏物理模拟相似准则,分析了各相似准数的物理意义,完善了气藏物理模拟的相似理论,为气藏开发物理模拟提供了理论指导。

2013 年 7 月 19 日收到, 国家科技重大专项(50150503-12)、塔里木油田勘探开发关键技术研究(2010E-2103)联合资助
第一作者简介:沈伟军(1987—),男,博士研究生,研究方向:渗流力学与气藏数值模拟。E-mail:wjshen763@gmail.com。

1　数学模型

1.1　基本假设

① 气藏条件是高压、等温渗流;② 气和水两相不溶混,Darcy 定律对气和水分别成立;③ 地层是均质和等厚的;④ 气、水粘度分别保持不变;⑤ 储层介质为多孔介质,具有各向同性;⑥ 考虑重力和毛管力的影响。

1.2　基本方程

假设气、水相分别服从达西定律,那么储层中气水两相控制方程可表示为:

$$\nabla\left[\rho_g \frac{K_g}{\mu_g}(\nabla p_g - \rho_g g)\right] = \frac{\partial(\phi \rho_g s_g)}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla\left[\rho_w \frac{K_w}{\mu_w}(\nabla p_w - \rho_w g)\right] = \frac{\partial(\phi \rho_w s_w)}{\partial t} \tag{2}$$

式中,ρ_g、ρ_w 分别为气相、水相的密度;K_g、K_w 分别为气相、水相的渗透率;μ_g、μ_w 分别为气相、水相的粘度;p_g、p_w 分别为气相、水相压力;g 为重力加速度;ϕ 为孔隙度;s_g 和 s_w 分别为气和水饱和度。

对于异常高压条件下,压缩系数 C 为一常数[15]。因此,状态方程可表示为

$$\rho_g = \rho_{g0}[1 + c_g(p_g - p_{g0})] \tag{3}$$

$$\rho_w = \rho_{w0}[1 + c_w(p_w - p_{w0})] \tag{4}$$

$$\phi = \phi_0\left[1 + c_\phi\left(\frac{p_g + p_w}{2} - \frac{p_{g0} + p_{w0}}{2}\right)\right] \tag{5}$$

式中,ρ_{g0}、ρ_{w0} 分别为气藏原始压力下气相、水相的密度;p_{g0}、p_{w0} 分别为气藏原始压力下气相、水相的压力;ϕ_0 为气藏原始状态下孔隙度;c_ϕ 为岩石压缩系数。

1.3　毛管力方程

$$p_c = p_g - p_w = \sigma\cos\theta\sqrt{\phi_g/K}J(s_w) \tag{6}$$

式(6)中,σ 为气水界面张力;θ 为气水界面润湿角;$J(s_w)$ 为 Leverrett$J$ 函数。

1.4　饱和度方程

$$s_g + s_w = 1 \tag{7}$$

初始条件:

$$\begin{cases} p_g|_{t=0} = p_{g0} \\ s_w|_{t=0} = s_{w0} \end{cases} \tag{8}$$

边界条件:

假设气藏外边界为封闭边界,则有:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial p_g}{\partial x} = 0, \dfrac{\partial p_g}{\partial y} = 0, \dfrac{\partial p_g}{\partial z} + \rho_g g = 0 \\ \dfrac{\partial p_w}{\partial x} = 0, \dfrac{\partial p_w}{\partial y} = 0, \dfrac{\partial p_w}{\partial z} + \rho_w g = 0 \end{cases} \tag{9}$$

2　相似准则的推导

引入无因次自变量:

$$x_D = \frac{x}{x_R}, y_D = \frac{y}{y_R}, z_D = \frac{z}{z_R},$$

$$t_D = \frac{B_g q_g t}{\phi_g x_R y_R z_R(1 - s_{cw} - s_{rg})} = \frac{B_g q_g t}{\phi_g x_R y_R z_R \Delta s}。$$

引入无因次因变量:

$$p_{gD} = \frac{p_g K_{rgw} z_R}{q_g \mu_w}, p_{wD} = \frac{p_w K_{rgw} z_R}{q_g \mu_w}, p_{cD} = \frac{p_c K_{rgw} z_R}{q_g \mu_w}。$$

引入无因次参量:

$$\mu_{gD} = \frac{\mu_g}{\mu_w}, \rho_{gD} = \frac{\rho_g}{\rho_{g0}}, \rho_{wD} = \frac{\rho_w}{\rho_{w0}},$$

$$c_{gD} = \frac{c_g q_g \mu_w}{K_{rgw} z_R}, c_{wD} = \frac{c_w q_g \mu_w}{K_{rgw} z_R},$$

$$c_{\phi D} = \frac{c_\phi q_g \mu_w}{K_{rgw} z_R}, p_{wgD} = \frac{p_{wg} K_{rgw} z_R}{q_g \mu_w},$$

$$p_{g0D} = \frac{p_{g0} K_{rgw} z_R}{q_g \mu_w}。$$

含水饱和度和相对渗透率归一化处理:

$$\bar{s}_w = \frac{s_w - s_{cw}}{1 - s_{cw} - s_{rg}} = \frac{s_w - s_{cw}}{\Delta s},$$

$$\bar{s}_g = \frac{s_g - s_{rg}}{1 - s_{cw} - s_{rg}} = \frac{s_g - s_{rg}}{\Delta s}, K_{gD} = \frac{K_g}{K_{cwg}},$$

$$K_{wD} = \frac{K_w}{K_{rgw}}。$$

其中,q_g 为采气井单位时间采气量;$\Delta s = 1 - s_{cw} - s_{rg}$,$x_R$,$y_R$,$z_R$ 分别为气藏三个方向的特征长度;s_{cw},s_{rg} 分别为束缚水饱和度和残余气饱和度,无量纲;K_{cwg},K_{rgw} 分别为束缚水条件下的气相的渗透率和残余气条件下水相的渗透率。

将以上无量纲参量和代入式(1)、式(2),则有

气相方程:

$$\left[\frac{\rho_{g0} K_{cwg} q_g \mu_w}{\mu_w K_{rgw} x_R^2 z_R}\right]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\frac{\rho_{gD} K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial x_D}\right) + \left[\frac{\rho_{g0} K_{cwg} q_g \mu_w}{\mu_w K_{rgw} y_R^2 z_R}\right] \times$$

$$\frac{\partial}{\partial y_D}\left(\frac{\rho_{gD}K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial y_D}\right)+\left[\frac{\rho_{g0}K_{cwg}q_g\mu_w}{\mu_w K_{rgw}z_R^{\ 3}}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial z_D}\right)-\left[\frac{\rho_{g0}^2K_{cwg}g}{\mu_w z_R}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}^2K_{gD}}{\mu_{gD}}\right)=\left[\frac{\rho_{g0}q_gB_g}{x_Ry_Rz_R}\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}\bar{s}_g)+\left[\frac{\rho_{g0}q_gs_{rg}B_g}{x_Ry_Rz_R\Delta s}\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}) \quad (10)$$

水相方程：

$$\left[\frac{\rho_{w0}K_{rgw}q_g\mu_w}{\mu_w K_{rgw}x_R^{\ 2}z_R}\right]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D}\right)+\left[\frac{\rho_{w0}K_{rgw}q_g\mu_w}{\mu_w K_{rgw}y_R^{\ 2}z_R}\right]\times\frac{\partial}{\partial y_D}\left(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D}\right)+\left[\frac{\rho_{w0}K_{rgw}q_g\mu_w}{\mu_w K_{rgw}z_R^{\ 3}}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{uD}}{\partial z_D}\right)-\left[\frac{\rho_{w0}^2K_{rgD}}{\mu_w z_R}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}(\rho_{wD}^2K_{wD})=\left[\frac{\rho_{w0}q_gB_g}{x_Ry_Rz_R}\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}\bar{s}_w)+\left[\frac{\rho_{w0}q_gs_{cw}B_g}{x_Ry_Rz_R\Delta s}\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}) \quad (11)$$

式(10)、式(11)两边分别除以 $\frac{\rho_{g0}q_g}{x_Ry_Rz_R}$、$\frac{\rho_{w0}q_g}{x_Ry_Rz_R}$，得

$$\left[\frac{K_{cwg}}{K_{rgw}}\frac{y_R}{x_R}\right]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\frac{\rho_{gD}K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial x_D}\right)+\left[\frac{K_{cwg}}{K_{rgw}}\frac{x_R}{y_R}\right]\times\frac{\partial}{\partial y_D}\left(\frac{\rho_{gD}K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial y_D}\right)+\left[\frac{K_{cwg}}{K_{rgw}}\frac{x_Ry_R}{z_R^{\ 2}}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}K_{gD}}{\mu_{gD}}\frac{\partial P_{gD}}{\partial z_D}\right)-\left[\frac{\rho_{g0}K_{cwg}gx_Ry_R}{\mu_w q_g}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}^2K_{gD}}{\mu_{gD}}\right)=[B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}\bar{s}_g)+\left[\frac{s_{rg}}{\Delta s}B_g\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}) \quad (12)$$

$$\left[\frac{y_R}{x_R}\right]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D}\right)+\left[\frac{x_R}{y_R}\right]\frac{\partial}{\partial y_D}(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D})+\left[\frac{x_Ry_R}{z_R^2}\right]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\rho_{wD}K_{wD}\frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D}\right)-\left[\frac{\rho_{w0}K_{rgD}x_Ry_R}{\mu_w q_g}\right]\times\frac{\partial}{\partial z_D}(\rho_{wD}^2K_{wD})=[B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}\bar{s}_w)+\left[\frac{s_{cw}}{\Delta s}B_g\right]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}) \quad (13)$$

状态方程无量纲化，则有

$$\rho_{gD}=1+c_{gD}(p_{gD}-p_{g0D}) \quad (14)$$

$$\rho_{wD}=1+c_{wD}(p_{wD}-p_{w0D}) \quad (15)$$

$$\phi=\phi_0\left[1+c_{\phi D}\left(\frac{p_{gD}+p_{wD}}{2}-\frac{p_{g0D}+p_{w0D}}{2}\right)\right] \quad (16)$$

毛管力方程无量纲化，则有

$$p_{cD}=p_{oD}-p_{wD}=\frac{\sigma\sqrt{\phi_0/K}\cos\theta K_{row}z_R}{q_g\mu_w}J(\bar{s}_w) \quad (17)$$

饱和度方程

$$\bar{s}_g+\bar{s}_w=1 \quad (18)$$

初始条件：

$$\begin{cases}p_{gD}\mid_{t_D=0}=p_{g0D}\\ \bar{s}_w\mid_{t=0}=\bar{s}_{wi}\end{cases} \quad (19)$$

外边界条件：

$$\begin{cases}\frac{\partial p_{gD}}{\partial x_D}=0,\quad \frac{\partial p_{gD}}{\partial y_D}=0,\\ \frac{\partial p_{gD}}{\partial z_D}+\frac{K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w}\rho_{g0}gz_R\rho_{gD}=0\\ \frac{\partial p_{wD}}{\partial x_D}=0,\quad \frac{\partial p_{wD}}{\partial y_D}=0,\\ \frac{\partial p_{wD}}{\partial z_D}+\frac{K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w}\rho_{w0}gz_R\rho_{wD}=0\end{cases} \quad (20)$$

由此，得到异常高压气藏开发物理模拟的无量纲控制方程组如下。

储层中无量纲气相控制方程

$$[\pi_1\ \pi_2]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\frac{\rho_{gD}\ \pi_6}{\pi_7}\frac{\partial P_{gD}}{\partial x_D}\right)+\left[\frac{\pi_1}{\pi_2}\right]\frac{\partial}{\partial y_D}\left(\frac{\rho_{gD}\ \pi_6}{\pi_7}\frac{\partial P_{gD}}{\partial y_D}\right)+[\pi_1\ \pi_2\ \pi_3^2]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}\ \pi_6}{\pi_7}\frac{\partial P_{gD}}{\partial z_D}\right)-[\pi_4]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\frac{\rho_{gD}^2\ \pi_6}{\pi_7}\right)=[B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}\ \pi_8)+[\pi_5B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{gD}) \quad (21)$$

储层中无量纲水相控制方程

$$[\pi_2]\frac{\partial}{\partial x_D}\left(\rho_{wD}\ \pi_{11}\frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D}\right)+\left[\frac{1}{\pi_2}\right]\frac{\partial}{\partial y_D}\left(\rho_{wD}\ \pi_{11}\frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D}\right)+[\pi_2\ \pi_3^2]\frac{\partial}{\partial z_D}\left(\rho_{wD}\ \pi_{11}\frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D}\right)-[\pi_9]\frac{\partial}{\partial z_D}(\rho_{wD}^2\ \pi_{11})=[B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}\ \pi_{12})+[\pi_{10}\ B_g]\frac{\partial}{\partial t_D}(\rho_{wD}) \quad (22)$$

无量纲状态方程

$$\rho_{gD}=1+\pi_{13}(p_{gD}-\pi_{14}) \quad (23)$$

$$\rho_{wD}=1+\pi_{15}(p_{wD}-\pi_{16}) \quad (24)$$

$$\phi=\pi_{17}\left[1+\pi_{18}\left(\frac{p_{gD}+p_{wD}}{2}-\frac{\pi_{14}+\pi_{16}}{2}\right)\right] \quad (25)$$

无量纲毛管力方程

$$p_{cD} = p_{gD} - p_{wD} = \pi_{19}\pi_{20} \tag{26}$$

无量纲饱和度方程

$$\bar{s}_g + \bar{s}_w = 1 \tag{27}$$

无量纲初始条件:

$$\begin{cases} p_{gD}\big|_{t_D=0} = \pi_{14} \\ \bar{s}_w\big|_{t=0} = \pi_{21} \end{cases} \tag{28}$$

无量纲外边界条件:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial p_{gD}}{\partial x_D} = 0, \dfrac{\partial p_{gD}}{\partial y_D} = 0, \dfrac{\partial p_{gD}}{\partial z_D} + \pi_{22}\rho_{gD} = 0 \\ \dfrac{\partial p_{wD}}{\partial x_D} = 0, \dfrac{\partial p_{wD}}{\partial y_D} = 0, \dfrac{\partial p_{wD}}{\partial z_D} + \pi_{23}\rho_{wD} = 0 \end{cases} \tag{29}$$

通过以上分析,可知异常高压气藏开发物理模拟相似准数共有 23 个:

$$\pi_1 = \frac{K_{cwg}}{K_{rgw}},\ \pi_2 = \frac{y_R}{x_R},\ \pi_3 = \frac{x_R}{z_R},\ \pi_4 = \frac{\rho_{g0}K_{cwg}x_Ry_R}{\mu_w q_g},$$

$$\pi_5 = \frac{s_{rg}}{\Delta s},\ \pi_6 = \frac{K_g}{K_{cwg}},\ \pi_7 = \frac{\mu_g}{\mu_w},\ \pi_8 = \bar{s}_g,$$

$$\pi_9 = \frac{\rho_{w0}K_{rgD}x_Ry_R}{\mu_w q_g},\ \pi_{10} = \frac{s_{cw}}{\Delta s},\ \pi_{11} = \frac{K_w}{K_{rgw}},$$

$$\pi_{12} = \bar{s}_w,\ \pi_{13} = \frac{c_g q_g \mu_w}{K_{rgw}z_R},\ \pi_{14} = \frac{p_{g0}K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w},$$

$$\pi_{15} = \frac{c_w q_g \mu_w}{K_{rgw}z_R},\ \pi_{16} = \frac{p_{w0}K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w},\ \pi_{17} = \phi_0,$$

$$\pi_{18} = \frac{c_\phi q_g \mu_w}{K_{rgw}z_R},\ \pi_{19} = \frac{\sigma\sqrt{\phi_g/K}\cos\theta\, K_{rgw}Z_R}{q_g\mu_w},$$

$$\pi_{20} = J(s_w),\ \pi_{21} = s_{wi},\ \pi_{22} = \frac{K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w}\rho_{g0}gz_R,$$

$$\pi_{23} = \frac{K_{rgw}z_R}{q_g\mu_w}\rho_{w0}gz_R。$$

各相似准数的物理意义如下:

π_1 表示束缚水条件下气相渗透率和残余气条件下水相渗透率之比;π_2、π_3 表示几何相似的准数;π_4、π_9 分别表示气相、水相重力和驱动力之比;π_5 表示残余气饱和度和可动气饱和度之比;π_6、π_{11} 分别表示无因次气相、水相渗透率;π_7 表示气水粘度之比;π_8、π_{12} 分别表示初始折算含气、含水饱和度;π_{10} 表示束缚水饱和度和可动气饱和度之比;π_{13}、π_{15}、π_{18} 表示采气量为 q_g 时的驱动压差引起的气、水和岩石体积相对变化量;π_{14}、π_{16} 分别表示气相、水相在原始地层压力下和在采气量为 q_g 时的驱动压差之比;π_{17} 表示储层原始状态下的平均孔隙度;π_{19} 表示采气量为 q_g 时毛管力和驱动压差之比;π_{20} 表示无因次毛管力函数;π_{21} 表示初始含水饱和度;π_{22}、π_{23} 分别表示气相、水相重力和驱动力之比。

3　分析与讨论

在异常高压气藏开发物理模拟中,若模型与原型采用相同的孔隙介质,那么可以保证模型的气水两相流动规律的相渗曲线、毛管力曲线与原型相同;若模型与原型不是采用相同的孔隙介质,那么就很难满足这两个条件,从而模型与原型的研究结果就没有参考价值。从以上 23 个相似准则来看,π_1、π_4、π_6、π_9、π_{11}、π_{13}、π_{14}、π_{15}、π_{16}、π_{18}、π_{19}、π_{22}、π_{23} 是含有 K_{cwg} 或 K_{rgw} 的受相渗规律影响的准则;π_{20} 是反映毛管力曲线特征的准则。与这两个方面相关的准数共有 14 个,说明了其在物理模拟中的重要性。

π_{17} 是反映储层孔隙度的准则,若模型与原型采用相同的孔隙介质,那么这一准则在实验中满足。

π_5、π_8、π_{10}、π_{20}、π_{21} 是反映储层饱和度特征的准则,若模型与原型采用相同的孔隙介质,那么这一准则在实验中满足。

π_2、π_3 是反映几何尺寸特征的准则,这一准则在实验中容易实现。

π_7 是反映气、水两相粘度比例的准则,这一准则在实验中容易实现。

在保证模型与原型采用相同的孔隙介质前提下,下面我们以某实际气田井组物理模拟实验为例来说明模型与原型之间参数换算关系。

为了在实验室条件下模拟异常高压气藏开发生产,需要将气田原型按一定比例缩小成相应的实验模型。若在实际单井气田开发中,所研究井组长度为 600 m,宽度为 100 m。实验室模型长度最大可做到 60 cm,从而可以确定长度比尺为 1 000 倍,即模型长度比尺为 1 000。由此确定模型宽度为 10 cm。

由 π_{22} 、π_{23} 可知,在保证流体密度和粘度不变的情况下,若要满足这两个相似准则,则采气速度比尺应为长度比尺的平方,其值为 1.00×10^6。按井组采气速度为 1.44×10^6 方/天计算,模型采气速度应为 1 000 mL/min。

根据采气速度的定义,时间比尺等于长度比尺的立方除以采气速度比尺,那么其值为 1 000,即模型生产 1 d(1 min),对应气藏生产 1 000 d(16.67 h)。

由 π_{19} 可知,若要满足这个相似准则,在长度比尺和采取速度确定条件下,需要将气水界面的张力缩小到 $1/10^3$ 倍,这在实验条件下很难完成。由 π_{14} 、π_{16} 可知,若要满足这 2 个相似准则,那么需要将模型初始压力缩小到 $1/10^3$ 倍,这在实验条件下也是很难完成的。因此,完全满足符合相似准则是很难实现的,在某些情况下必须放松一些相似准则,建立只满足部分相似准数的相似模型,即对控制物理现象和过程的主要无量纲参数进行完全模拟,而对次要相似准数进行放松。

4 结论

(1) 从异常高压驱气藏气水两相的基本方程出发,应用检验分析方法推导了异常高压气藏开发物理模拟的相似准则,分析了各相似准则的物理意义,通过模型与原型参数的参数关系换算,可以为异常高压气藏开发物理模拟提供理论依据和设计原则。

(2) 从分析与讨论中,对于复杂物理问题要完全满足所有相似准则是很难实现的。因此,在实际中,对于复杂物理问题,只能采用部分相似模拟,在模拟中对主要的无量纲参数进行完全模拟,对次要相似参数进行放松。

参 考 文 献

1 李熙喆, 万玉金, 陆家亮. 复杂气藏开发技术. 北京:石油工业出版社,2010

2 徐 挺. 相似理论与模型试验. 北京: 中国农业出版社, 1982

3 谢道夫. 力学中的相似方法与量纲理论. 北京: 科学出版社, 1983

4 Leverett M C, Lewis W B, True M E. Dimensional-model Studies of oil-field behavior. SPE J, 1942; 146 (1): 175—193

5 Papoport L A, Member A. Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models. SPE 415—G, 1954

6 Geertsma J, Geertsma, G A, Schwarz N. Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs. SPE 539—G, 1956

7 Perkins F M, Jr Collins R E. Scaling laws for laboratory flow models of oil reservoirs. SPE 1487—G, 1960

8 Khan A R. A scale study of water coning. SPE 2456, 1970

9 田启华. 厚油层水驱过程的相似准数及其应用. 大庆石油地质与开发, 1983; 2(4): 281—291

10 孔祥言, 陈峰磊, 裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相似准则. 石油勘探与开发, 1997; 24(6): 56—60

11 白玉湖, 李家春, 周济福. 水驱油两相流物理模拟相似参数的敏感性分析. 中国科学 E 辑 工程科学 材料科学, 2005; 35 (7): 761—772

12 Bai Yuhu, Li Jiachun, Zhou Jifu. Effects of physical parameter range on dimensionless variable sensitivity in water flooding reservoir. Acta Mechanica Sinica, 2006; 22(5): 285—391

13 Bai Yuhu, Li Qingping. Mathematical model of gas hydrate dissociation and its application on a hydrate reservoir underlain by a gas zone. The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009; I-09-324

14 Bai Yuhu, Li Qingping. The comparisons of production behavior of gas producing from gas and gas hydrate reservoirs. SPE, 137165—MS, 2010

15 庄惠农. 气藏动态描述和试井. 北京: 石油工业出版社, 2009

Similarity Theory of Physical Simulation in the Dvelopment of Abnormal Pressure Gas Reservoirs

SHEN Wei-jun[1,3], LI Xi-zhe[2], LU Jia-liang[2], LIU Xiao-hua[2]

(Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences[1], Langfang 065007, P. R. China;
Branch, Petro-China Research Institute of Petroleum Exploration and Development[2], Langfang 065007, P. R. China;
University of Chinese Academy of Sciences[3], Beijing 100049, P. R. China)

[**Abstract**] In order to apply physical simulation results into gas fields and provide theoretical guidance for gas fields development project, on the basis of previous water-flooding reservoir studies, the similarity rules of physical simulation are deduced in the development of abnormal pressure gas reservoirs from the basic equation of two -phase gas and water gas reservoirs considering the characteristic of abnormal pressure gas reservoirs, then analyzed the physical significance of each similar rules. Based on these results, the conversion relationship of reservoir parameters and the model parameters was analysed and discussed so as to quantize the relationship between the prototype and the model. As can see, it is difficult to fully meet all the similarity criterion, and part of similar simulation was used. This means the main dimensionless parameters of the simulation were simulated, and the secondary similarity parameters were relaxed. The conversion relationship between the model and the prototype, according to the similarity criterion derived, can provide the theoretical basis and design principles for physical simulation in the development of abnormal pressure gas reservoir.

[**Key words**] abnormal pressure gas reservoirs physical simulation similar rule similarity theory