

引用格式:刘秀伟,王星,程时清,等.耦合温度影响的动态非线性渗流模型[J].油气地质与采收率,2024,31(3):178-185.
LIU Xiuwei, WANG Xing, CHENG Shiqing, et al. A dynamic non-linear flow model coupling temperature influence[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 178-185.

耦合温度影响的动态非线性渗流模型

刘秀伟¹, 王星², 程时清¹, 张凤博³, 汪洋¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油集团测井有限公司地质研究院, 陕西 西安 710000;
3. 长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:针对现有非线性渗流模型未考虑温度变化对非线性渗流规律的影响,首先从毛细管渗流模型、Hagen-Poiseuille公式以及边界层理论出发,结合温度对边界层厚度及流体屈服应力的影响,推导得到低渗透多孔介质中耦合温度影响的动态非线性渗流模型。其次,利用已发表文献中的实验数据开展拟合验证,得到的渗流速度曲线及最小启动压力梯度与实验数据吻合度高,验证了动态非线性渗流模型的准确性,同时与静态非线性渗流模型和达西渗流模型的对比分析,进一步揭示了动态非线性渗流模型的合理性。针对渗流速度曲线进行敏感性分析表明,拟合系数 A 和 B 取值的增大均会导致渗流速度曲线右移,非线性渗流段曲线弯曲程度减弱,最小启动压力梯度增加。温度升高对渗流速度曲线影响程度较大,导致渗流速度曲线大幅上移,非线性渗流段弯曲程度减弱,最小启动压力梯度同样会增加。该动态非线性渗流模型的提出进一步丰富了非线性渗流理论的发展,可推广至相关两相流及高温高压油气藏数值模拟研究。

关键词:温度;非线性渗流;模型推导;模型验证与对比;敏感性参数分析

文章编号:1009-9603(2024)03-0178-08

DOI:10.13673/j.pgre.202310015

中图分类号:TE312

文献标识码:A

A dynamic non-linear flow model coupling temperature influence

LIU Xiuwei¹, WANG Xing², CHENG Shiqing¹, ZHANG Fengbo³, WANG Yang¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Research Institute of Geology, China National Logging Corporation, Xi'an City, Shaanxi Province, 710000, China; 3. Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710000, China)

Abstract: The existing non-linear flow model does not consider the influence of temperature change on the non-linear flow law. Therefore, based on the capillary flow model, the Hagen-Poiseuille equation, and the boundary layer theory, as well as the influence of the temperature on the thickness of the boundary layer and the yield stress of the fluid, a dynamic non-linear flow model in low-permeability porous media considering the influence of temperature was derived. Then, the fitting verification was carried out according to the experimental data in published literature, and the calculated flow velocity curve and minimum start-up pressure gradient were highly consistent with the experimental data, which revealed the correctness of the dynamic non-linear flow model. Meanwhile, the comparative analysis with the static non-linear flow model and the Darcy flow model illustrated the rationality of the dynamic non-linear flow model. The sensitivity analysis of the flow velocity curve revealed that the increase in coefficients A and B made the flow velocity curve right-shift; the curvature degree of the non-linear flow section was weakened, and the minimum start-up pressure gradient was increased. The increase in the temperature had a much more significant effect on the flow velocity curve, which made the velocity curve move up obviously. The curvature degree of the non-linear flow section weakened, and the

收稿日期:2023-10-16。

作者简介:刘秀伟(1996—),男,江苏连云港人,在读博士研究生,从事复杂裂缝性储层传质传热数值模拟研究。E-mail:lxw19960606@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“致密油藏注水诱导动态裂缝扩展机理研究”(52104049),国家科技重大专项“致密油藏注水诱发微裂缝机理及反演方法”(ZX20180177)。

minimum start-up pressure gradient increased. The proposal of this dynamic non-linear flow model further enriches the development of the non-linear flow theory and can be extended to the numerical simulation of two-phase flow and high-temperature and high-pressure oil and gas reservoirs.

Key words: temperature; non-linear flow; model derivation; model verification and comparison; sensitivity parameter analysis

非线性渗流的研究可回溯至上世纪60年代,学者们发现在低渗透多孔介质中当压力梯度较低时,渗流速度与压力梯度存在非线性关系,两者不再符合达西定律^[1-2]。如图1所示,整个非线性渗流曲线划分为3段:非渗流段(*oa*段)、非线性渗流段(*ab*段)以及线性渗流段(*bc*段)。其中*a*点对应最小启动压力梯度,当压力梯度大于最小启动压力梯度后,渗流开始出现且曲线呈下凹形。当压力梯度大于*c*点(临界压力梯度点),渗流速度与压力梯度呈线性关系^[3-4]。

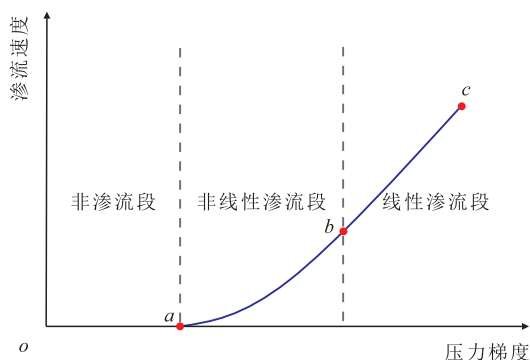


图1 非线性渗流曲线示意
Fig.1 Non-linear flow curve

关于非线性渗流这一现象的机理,中外学者开展了大量的研究。MILLER等众多学者认为,由于各种界面力与分子间力的综合作用,在靠近孔隙壁面附近的流体与固体壁面之间存在强烈的固液相互作用,在孔隙壁面形成边界层,边界层具有一定厚度且占据了孔隙通道的一部分^[5-10]。而在低渗透多孔介质中,边界层的厚度与纳米级孔隙半径相当,此时需要更大的压力梯度来克服边界层的黏滞阻力,从而触发流体的流动。即边界层的存在是导致非线性渗流的主要因素,而边界层的形成又与多孔介质的孔隙结构^[11-12]、孔隙结构与流体之间的相互作用^[13-14]以及流体的性质有关^[15-16]。

基于上述机理,中外学者对非线性渗流提出了多种渗流数学模型。如SONI等提出了通过拟合不同系数表征不同压力梯度下渗流特征的连续幂函数模型^[17]。程时清等提出了一种拟启动压力梯度分段函数模型,当压力梯度低于拟启动压力梯度时渗流速度为0,高于拟启动压力梯度时服从线性变化规律^[18]。李爱芬等也提出了一种分段函数模型,

不同的是,其在非线性渗流段采用多项式拟合表征,在线性渗流段采用拟启动压力梯度模型^[19]。姜瑞忠等基于毛细管模型和边界层理论,推导了物理意义较为明确的两参数连续型非线性渗流模型^[20]。WANG等基于多项式拟合提出了多参数指数函数型渗流数学模型,体现了流体流动能力对非线性渗流的影响^[21]。此外,邓英尔等均提出了各自的非线性渗流数学模型^[22-24]。然而上述非线性渗流数学模型均未考虑温度的影响。

目前,大规模体积压裂以及相关注水吞吐等技术应用于深层、超深层低渗透致密油藏的开发^[25-26],导致大量低于储层温度的流体进入高温储层中^[27-29],流体流动呈现非线性渗流特征,且由于储层内部温度发生变化,导致非线性渗流规律发生变化,已有的非线性渗流模型无法准确描述储层内部流体流动规律。因此,笔者从温度对黏度的影响出发,推导了耦合温度影响的动态非线性渗流模型,并利用已发表文献中的实验数据对该模型进行拟合验证,对相关参数进行敏感性分析。

1 模型推导与分析

1.1 机理分析

温度影响孔隙结构与流体之间的相互作用以及流体的性质,所以边界层的形成及其厚度的变化必然与温度有关,这一现象也被TENG等^[30]所证实,即温度对非线性渗流的规律也存在影响。从机理(图2)分析,一方面随着温度的升高,边界层流体黏度降低,在相同驱替压力梯度下靠近孔隙中心的边界层流体更容易参与流动,致使边界层厚度降低。另一方面,温度升高会降低孔隙固体壁面与流体分子之间的相互作用能量,致使固液相互作用减弱,靠近孔隙壁面的流体吸附在孔隙壁面的能力降低,致使形成的边界层厚度降低。温度降低则出现相反情况,即温度的变化影响着边界层厚度的变化,进而影响整体的非线性渗流规律,非线性渗流规律随着温度发生动态变化。

1.2 模型推导

毛细管模型是多孔介质渗流理论中公认的理想模型,其将真实多孔介质储层空间简化成直径相

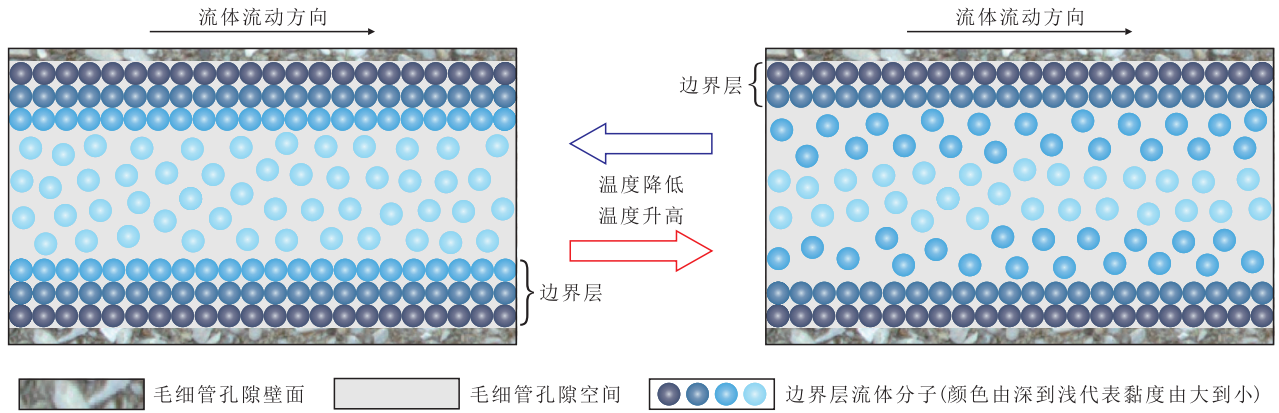


图2 温度变化对边界层影响示意

Fig.2 Effect of temperature change on boundary layer

等的平行毛细管束(图3)。

假设单根毛细管孔隙壁面存在厚度为 δ 的边界层。在稳定渗流时,流体所受驱动力与黏滞力相等,表达式为:

$$\Delta p \pi (R - \delta)^2 = 2 \pi (R - \delta) L \tau \quad (1)$$

其中:

$$\tau = \tau_0 - \mu \frac{du}{dr} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,并沿径向积分整理可得^[20]:

$$u = \frac{\Delta p}{4 \mu L} \left[(R - \delta)^2 - r^2 \right] + \frac{\tau_0}{\mu} [r - (R - \delta)] \quad (3)$$

进一步对(3)式进行空间上的积分可得:

$$\begin{aligned} q &= \int_0^{R-\delta} u 2 \pi r dr \\ &= \int_0^{R-\delta} \left\{ \frac{\Delta p}{4 \mu L} [(R - \delta)^2 - r^2] + \frac{\tau_0}{\mu} [r - (R - \delta)] \right\} 2 \pi r dr \\ &= \frac{\pi R^4}{8 \mu} \nabla p \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^4 \left[1 - \frac{8 \tau_0}{3 R \nabla p \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

假设真实多孔介质储层空间可以等价为单位面积上有 N 根毛细管组成的毛细管束,则在面积为 S 的岩石表面上通过的流体体积流量可由(4)式计算得到,结合Hagen-Poiseuille公式推导的毛细管模型中孔隙度和渗透率表达式,最终可得到考虑边界层影响的多孔介质储层内渗流速度,计算公式^[31]为:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^4 \left[1 - \frac{8 \tau_0}{3 R \nabla p \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)} \right] \quad (5)$$

徐绍良等测定了去离子水通过微圆管时流量与压力梯度之间的关系,并计算出去离子水在微圆管中边界层厚度随压力梯度的变化曲线(图4)^[32],可以看出,随着压力梯度的增加,边界层厚度逐渐减小,即边界层厚度与压力梯度成反比关系。在此假设边界层厚度与流体黏度呈线性正相关关系,而黏度的变化主要由温度变化引起,因此选取黏度的变化来表征温度变化对边界层厚度的影响。结合边界层厚度与压力梯度、流体黏度的关系,合理假设(5)式中边界层厚度与毛细管半径比值具有如下关系:

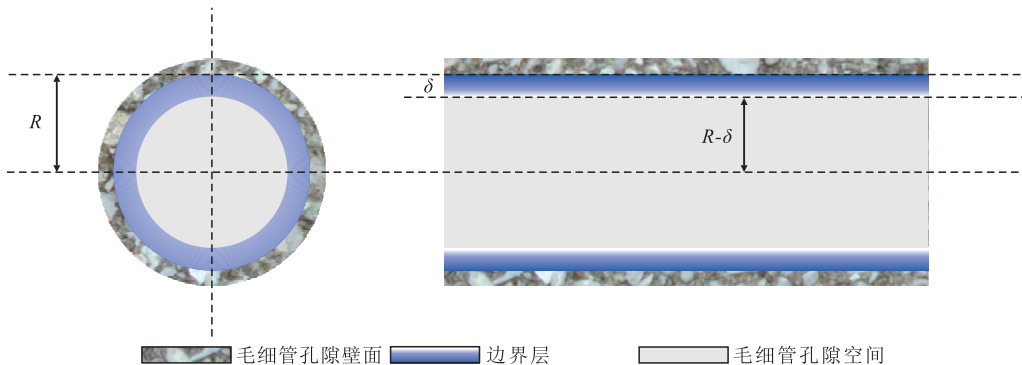
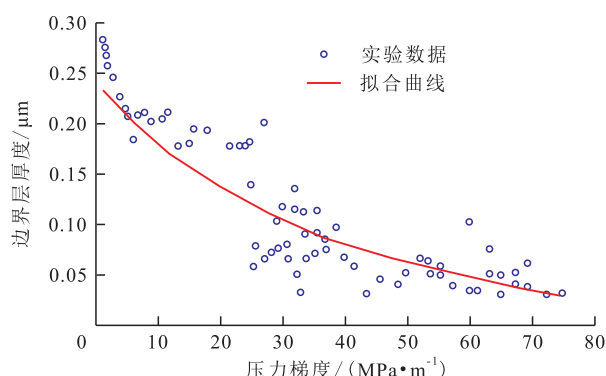


图3 毛细管模型示意

Fig.3 Diagrammatic sketch of capillary model

图4 边界层厚度随压力梯度的变化曲线^[32]Fig.4 Variation of thickness of boundary layer with pressure gradient^[32]

$$\frac{\delta}{R} = \frac{a_1 \mu b_1}{\nabla p} \quad (6)$$

对于流体屈服应力而言,当温度保持不变时其可视为一个定值。但是考虑温度变化后,流体黏度随着温度升高而降低,流体屈服应力也因此降低,所以在此假设(5)式中:

$$\frac{8\tau_0}{3R} = a_2 \mu b_2 \quad (7)$$

将(6)和(7)式代入(5)式中合并为:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{a_1 \mu b_1}{\nabla p} \right) \left[1 - \frac{a_2 \mu b_2}{\nabla p (1 - a_1 \mu b_1)} \right] = \frac{K}{\mu} \nabla p \left[1 - \frac{4a_1 \mu b_1 + a_2 \mu b_2}{\nabla p - a_1 \mu b_1} + \frac{10(a_1 \mu b_1)^2 + 4(a_1 \mu b_1)(a_2 \mu b_2)}{\nabla p (\nabla p - a_1 \mu b_1)} - \frac{4(a_1 \mu b_1)^3}{\nabla p^3} - \frac{6(a_1 \mu b_1)^2(a_2 \mu b_2)}{\nabla p^2 (\nabla p - a_1 \mu b_1)} + \frac{4(a_1 \mu b_1)^3(a_2 \mu b_2)}{\nabla p^3 (\nabla p - a_1 \mu b_1)} + \frac{(a_1 \mu b_1)^4}{\nabla p^4} - \frac{(a_1 \mu b_1)^4(a_2 \mu b_2)}{\nabla p^4 (\nabla p - a_1 \mu b_1)} \right] \quad (8)$$

忽略(8)式高阶小项,简化可得:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{4a_1 \mu b_1 + a_2 \mu b_2}{\nabla p - a_1 \mu b_1} + 1 - \frac{4a_1 \mu b_1 + a_2 \mu b_2}{\nabla p - a_1 \mu b_1} \right) \quad (9)$$

当压力梯度为0时,渗流速度为0,(9)式变为:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{4a_1 \mu b_1 + a_2 \mu b_2}{\nabla p - a_1 \mu b_1} \right) \quad (10)$$

考虑到 a_1 与 a_2 , b_1 与 b_2 物理意义相同,令:

$$A = 4a_1 b_1 + a_2 b_2 \quad (11)$$

$$B = a_1 b_1 \quad (12)$$

将(11)和(12)式代入(10)式,得到耦合温度影响的动态非线性渗流模型,可写为:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{A\mu}{\nabla p - B\mu} \right) \quad (13)$$

1.3 模型内涵分析

模型在非线性系数前增加了黏度项用以表征温度对非线性渗流的影响,当不考虑温度影响时可去除黏度项,该模型便退化为静态非线性渗流模型^[20]。

模型中的两个系数 A 和 B 都可以通过函数非线性拟合获得,且各自存在其物理意义。系数 A 综合反映流体屈服应力及边界层厚度对非线性渗流的影响,系数 B 主要体现的是边界层厚度对非线性渗流的影响。由于流体屈服应力及边界层厚度与温度有关,即系数 A 和 B 均能反映温度对非线性渗流的影响。

从模型中也可以看出,使得渗流开始的最小启动压力梯度为:

$$\nabla p_{\min} = \mu(A + B) \quad A + B \geq 0 \quad (14)$$

从(14)式可以看出,不考虑黏度项时可以得到不考虑温度影响的最小启动压力梯度。同时也可以看出,随着温度的升高,流体黏度降低,最小启动压力梯度也降低,这与ZENG等研究成果^[33]相符,说明了该模型的合理性。

2 模型验证与对比

2.1 模型验证

为验证模型的准确性与合理性,根据TENG等已发表文献中的实验数据^[30]进行拟合,拟合结果如图5所示,相关基本参数与拟合系数如表1所示。

从图5可以看出,模型计算得到的渗流速度曲线与实验数据拟合效果好,验证了模型的准确性。利用拟合得到的系数 A 和 B 以及(14)式计算每组编号对应的最小启动压力梯度并与实验数据对比,如表2和图6所示,模型预测的最小启动压力梯度与实验数据相近,5组数据中仅有1组数据的误差超过5%但小于10%,其余均小于5%,这也进一步说明了模型的准确性。

2.2 模型对比

为了对比动态与静态非线性渗流模型及达西渗流模型的区别,设置温度为20℃,流体黏度为1.01 mPa·s,渗透率为0.140 mD,动态非线性拟合系数 A 和 B 分别为 0.9×10^9 和 $-0.6 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为使静态与动态非线性渗流模型计算结果相同,反算出静态非线性拟合系数 A 和 B 分别为 0.909×10^9 和 $0.606 \times$

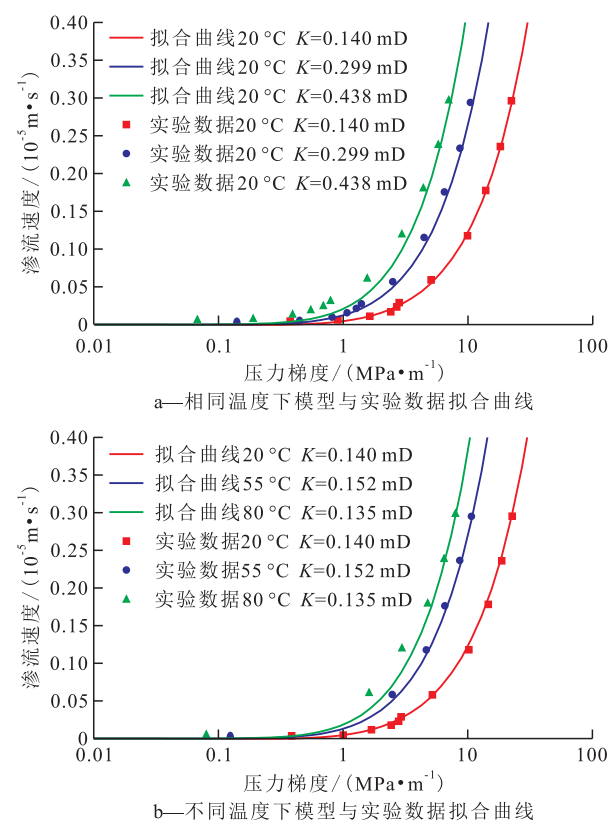


图5 模型与实验数据拟合对比曲线

Fig.5 Fitting curves of model and experimental data [25]

表1 所用基本参数和拟合系数					
Table1 Basic parameters and fitting parameters					
编号	温度/ °C	渗透率/ mD	黏度/ (mPa·s)	拟合系数 A/ (10 ⁹ m ¹ ·s ⁻¹)	拟合系数 B/ (10 ⁹ m ¹ ·s ⁻¹)
1	20	0.140	1.01	0.619 8	-0.255 4
2	20	0.299	1.01	0.724 1	-0.576 6
3	20	0.438	1.01	0.685 5	-0.621 5
4	55	0.152	0.51	0.852 4	-0.591 1
5	80	0.135	0.32	0.574 1	-0.317 3

表2 模型预测最小启动压力梯度与实验数据对比			
Table2 Comparison between minimum start-up pressure gradient predicted by model and experimental data			
编号	实验最小启动压力梯度/(MPa·m ⁻¹)	模型预测最小启动压力梯度/(MPa·m ⁻¹)	误差/%
1	0.380	0.368	3.16
2	0.142	0.149	4.93
3	0.062	0.060	4.05
4	0.123	0.133	8.13
5	0.083	0.081	2.59

10⁶ Pa/m。基于前述参数绘制的3种模型渗流速度曲线如图7所示,可以看出动态与静态非线性渗流模型计算结果相同,能够反映出非线性渗流段,且二者计算得到的渗流速度低于达西渗流模型。

保持动态和静态非线性渗流模型拟合系数不

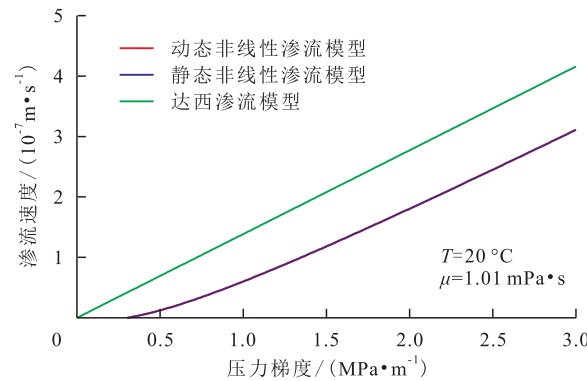
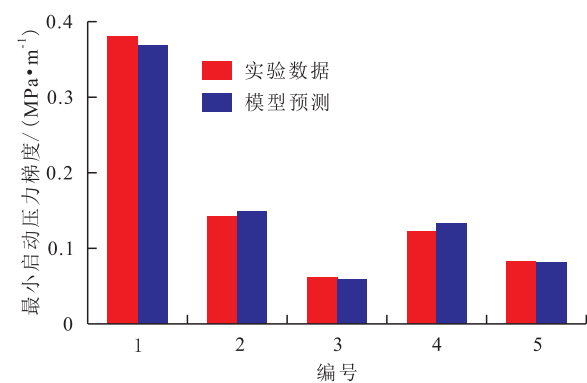


图7 20 °C下3种模型的渗流速度曲线对比

Fig.7 Comparison of flow velocity curves calculated by three different models at 20 °C

变,绘制温度为55 °C,流体黏度为0.51 mPa·s的3种模型渗流速度曲线(图8),可以发现动态非线性渗流模型计算得到的渗流速度曲线介于达西渗流模型和静态非线性渗流模型之间。这是因为达西渗流模型无法反映非线性渗流特征,并且静态非线性渗流模型未考虑温度变化导致黏度变化引起的非线性渗流规律变化。动态非线性渗流模型既能反映非线性渗流特征,同时加入黏度项又能更好地反映温度变化对非线性渗流的影响,此对比进一步说明了模型的合理性。

3 敏感性参数分析

针对渗流速度曲线进行敏感性分析,以进一步耦合温度影响的动态非线性渗流模型。基本参数包括:温度为20 °C,流体黏度为1.01 mPa·s,渗透率为0.140 mD。

3.1 拟合系数A

系数A对渗流速度曲线的影响如图9所示,系数A反映流体屈服应力及边界层厚度对非线性渗流的影响,从前述推导可以看出,系数A越大,相同温

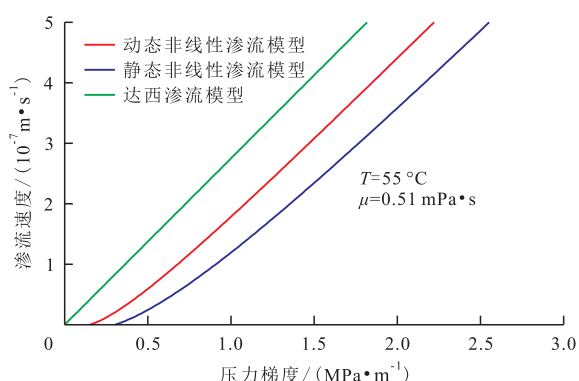


图8 55 °C下3种模型的渗流速度曲线对比

Fig.8 Comparison of flow velocity curves calculated by three different models at 55 °C

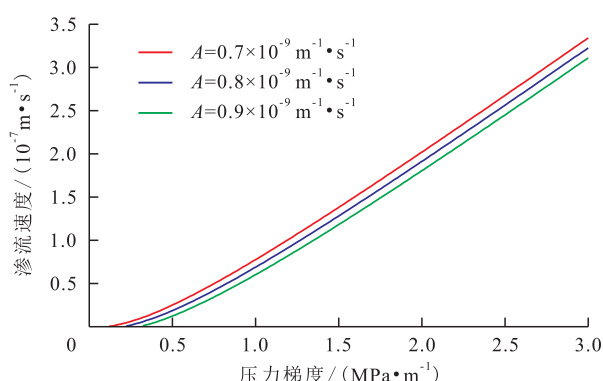


图9 系数A对渗流速度曲线的影响

Fig.9 Effect of coefficient A on flow velocity curve

度下流体屈服应力及边界层厚度越大。因此随着系数A取值的增加,整体渗流速度曲线向右移动,非线性渗流段曲线弯曲程度减弱,最小启动压力梯度增加。

3.2 拟合系数B

系数B取值越大,边界层厚度越大,且其对非线性渗流的影响越大。从图10中可以看出,渗流速度曲线同样向右偏移,非线性渗流段弯曲程度减弱,最小启动压力梯度增加。

3.3 温度

温度越高代表流体黏度越小,流体屈服应力及边界层厚度也越小。从图11可以看出,随着温度的增加,整体渗流速度曲线变化幅度较大,曲线整体向上偏移,非线性渗流段弯曲程度减弱,并且最小启动压力梯度也在降低。

4 结论

(1)基于毛细管模型、Hagen-Poiseuille公式及边界层理论,推导出耦合温度影响的动态非线性渗流模型,该模型能够体现温度变化对低渗透多孔介质中非线性渗流的影响。

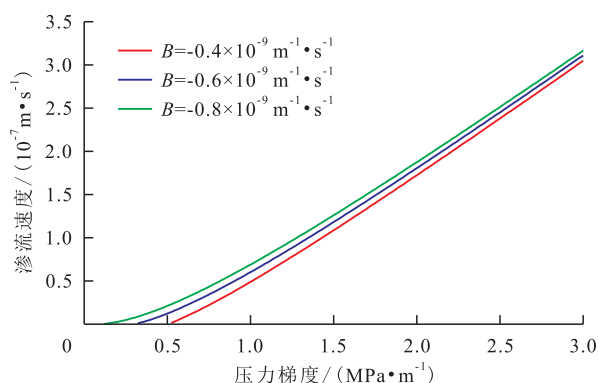


图10 系数B对渗流速度曲线的影响

Fig.10 Effect of coefficient B on flow velocity curve

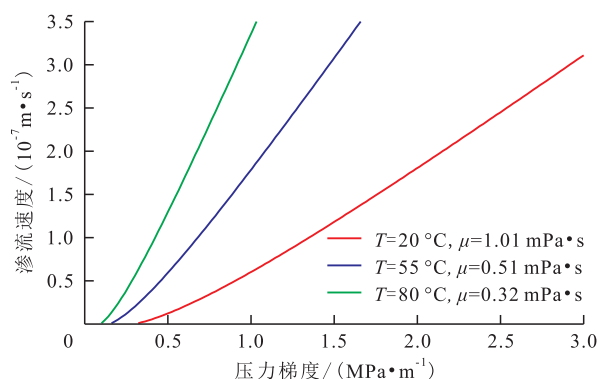


图11 温度对渗流速度曲线的影响

Fig.11 Effect of temperature on flow velocity curve

(2)利用已发表文献中的实验数据对模型进行拟合验证,通过与静态非线性渗流模型以及达西渗流模型的对比,证实了动态非线性渗流模型的准确性与合理性。

(3)敏感性参数分析表明,不同拟合系数对渗流速度曲线的影响规律符合各自物理意义,同时温度变化的影响程度较大。

(4)耦合温度影响的动态非线性渗流模型能较好地反映温度变化对非线性渗流的影响规律,可以进一步通过“渠道流”理论拓展到两相问题,并可以引入到相关低渗透致密高温高压油藏的数值模拟中,具有一定的应用价值。

符号解释

- a_1, a_2 —— 黏度相关拟合系数,表征温度变化的影响, $\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;
- A, B —— 非线性系数, $\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;
- b_1, b_2 —— 渗流特征相关拟合系数,表征压力梯度变化的影响, Pa/m ;
- du/dr —— 沿半径法线方向上的剪切速率, s^{-1} ;
- K —— 多孔介质储层渗透率, m^2 ;
- L —— 毛细管长度, m ;
- q —— 毛细管内体积流量, m^3/s ;

r —— 沿半径方向距离, m;
 R —— 毛细管半径, m;
 u —— 沿半径方向上的流速, m/s;
 δ —— 边界层厚度, m;
 τ —— 流体屈服应力, Pa;
 τ_0 —— 流体初始屈服应力, Pa;
 μ —— 黏度, Pa·s;
 Δp —— 毛细管两端压差, Pa;
 ∇p —— 压力梯度, Pa/m。

参考文献

- [1] SWARTZENDRUBER D. Non-darcy flow behavior in liquid-saturated porous media [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(13): 5 205-5 213.
- [2] LUTZ J F, KEMPER W D. Intrinsic permeability of clay as affected by clay-water interaction [J]. Soil Science, 1959, 88 (2): 83-90.
- [3] 王恩志, 韩小妹, 黄远智. 低渗岩石非线性渗流机理讨论[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 120-124.
WANG Enzhi, HAN Xiaomei, HUANG Yuanzhi. Discussion on the mechanism of percolation in low permeability rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 120-124.
- [4] 姜瑞忠, 杨仁锋. 低渗透油藏非线性渗流理论与数值模拟技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
JIANG Ruizhong, YANG Renfeng. Nonlinear percolation theory and numerical simulation technology in low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [5] MILLER R J, LOW P F. Threshold gradient for water flow in clay systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(6): 605-609.
- [6] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
HUANG Yanzhang. Seepage mechanism in low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [7] 苑莲菊, 李振栓, 武胜忠, 等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
YUAN Lianju, LI Zhenshuan, WU Shengzhong, et al. Engineering seepage mechanics and its application [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2001.
- [8] 杨仁锋, 姜瑞忠, 孙君书, 等. 低渗透油藏非线性微观渗流机理[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 90-93.
YANG Renfeng, JIANG Ruizhong, SUN Junshu, et al. Study on non-linear flow mechanism in low permeability porous media [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18 (2): 90-93.
- [9] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 35-38.
LI Zhongfeng, HE Shunli. Non-Darcy percolation mechanism in low permeability reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(2): 35-38.
- [10] 刘德新, 岳湘安, 燕松, 等. 吸附水层对低渗透油藏渗流的影响机理[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 40-42.
LIU Dexin, YUE Xiang'an, YAN Song, et al. Influential mechanism of adsorbed water layers on percolation in low permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6): 40-42.
- [11] PRADA A, CIVAN F. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 22(4): 237-240.
- [12] 吴景春, 袁满, 张继成, 等. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非达西渗流特征[J]. 东北石油大学学报, 1999, 23(2): 84-86.
WU Jingchun, YUAN Man, ZHANG Jicheng, et al. Characteristics of single-phase low-velocity of Non-Darcy flow in a low-permeability reservoir in eastern Daqing [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 1999, 23(2): 84-86.
- [13] 邓英尔, 阎庆来, 马宝岐. 界面分子力作用与渗透率的关系及其对渗流的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 62-65.
DENG Yinger, YAN Qinglai, MA Baoqi. Relationship between interfacial molecular interaction and permeability and its influence on fluid flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(2): 62-65.
- [14] LONGMUIR Gavin. Pre-Darcy flow: A missing piece of the improved oil recovery puzzle [C]. SPE-89433-MS, 2004.
- [15] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998.
LI Zhaomin, CAI Guoyan. Non-Newtonian fluid mechanics [M]. Beijing: University of Petroleum Press, 1998.
- [16] FARMANI Z, AZIN R, FATEHI R, et al. Analysis of Pre-Darcy flow for different liquids and gases [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 17-31.
- [17] SONI J P, ISLAM N, BASAK P. An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media [J]. Journal of Hydrology, 1978, 38(3/4): 231-241.
- [18] 程时清, 陈明卓. 油水两相低速非达西渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 57-59.
CHENG Shiqing, CHEN Mingzhuo. Numerical simulation of two-dimensional two-phase non-Darcy slow flow [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(1): 57-59.
- [19] 李爱芬, 刘敏, 张少辉, 等. 特低渗透油藏渗流特征实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(2): 35-39.
LI Aifen, LIU Min, ZHANG Shaohui, et al. Experimental study on percolation characteristic of extra low-permeability reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(2): 35-39.
- [20] 姜瑞忠, 李林凯, 徐建春, 等. 低渗透油藏非线性渗流新模型及试井分析[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 264-268.
JIANG Ruizhong, LI Linkai, XU Jianchun, et al. A nonlinear mathematical model for low-permeability reservoirs and well-testing analysis [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (2) : 264-268.
- [21] WANG X, SHENG J J. Effect of low-velocity non-Darcy flow on well production performance in shale and tight oil reservoirs [J]. Fuel, 2017, 190: 41-46.

- [22] 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-77.
DENG Yinger, LIU Ciqun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-77.
- [23] 黄延章, 杨正明, 何英, 等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1-8.
HUANG Yanzhang, YANG Zhengming, HE Ying, et al. Non-linear porous flow in low permeability porous media [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1-8.
- [24] CHEN C. A continuum-scale two-parameter model for non-Darcian flow in low-permeability porous media [J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27(7): 2 637-2 643.
- [25] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 22-30.
REN Zhanli, CUI Junping, QI Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 22-30.
- [26] 王林生, 梁利喜, 覃建华, 等. 玛湖砾岩油藏水平井压裂井间窜扰特征与机制分析[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(6): 129-137.
WANG Linsheng, LIANG Lixi, QIN Jianhua, et al. Characteristics and mechanism of inter-well interference in horizontal well fracturing in Mahu conglomerate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 129-137.
- [27] 徐润滋, 杨胜来, 王吉涛, 等. 高温高压下陆相致密油藏非稳态压裂液渗吸机理研究[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(3): 94-103.
XU Runzi, YANG Shenglai, WANG Jitao, et al. Study on unsteady imbibition mechanism of fracturing fluid in tight continental reservoirs under high temperature and high pressure [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(3): 94-103.
- [28] 王飞, 吴宝成, 廖凯, 等. 从闷井压力反演页岩油水平井压裂裂缝参数和地层压力[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 624-629.
WANG Fei, WU Baocheng, LIAO Kai, et al. Inversion of fracture parameters and formation pressure for fractured horizontal wells in shale oil reservoir based on soaking pressure [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 624-629.
- [29] 刘继梓, 巩联浩, 卜广平, 等. 致密砂岩油藏高温高压动态渗吸特征及影响因素[J]. 特种油气藏, 2021, 28(4): 142-149.
LIU Jizi, GONG Lianhao, BU Guangping, et al. Characteristics and influencing factors of dynamic imbibition at high temperature and high pressure in tight sandstone reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(4): 142-149.
- [30] TENG Y, WANG Y, LI Z, et al. Temperature effect on non-Darcian flow in low-permeability porous media [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128780.
- [31] 杨仁锋, 姜瑞忠, 刘世华, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 299-306.
YANG Renfeng, JIANG Ruizhong, LIU Shihua, et al. Numerical simulation of nonlinear seepage in ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 299-306.
- [32] 徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 60-63.
XU Shaoliang, YUE Xiang'an. Experimental research on nonlinear flow characteristics at low velocity [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(5): 60-63.
- [33] ZENG J, CHENG S, KONG X, et al. Non-Darcy flow in oil accumulation (oil displacing water) and relative permeability and oil saturation characteristics of low-permeability sandstones [J]. Petroleum Science, 2010, 7: 20-30.

编辑 林 璐