

## 低渗透油藏渗透率及启动压力梯度 应力敏感性分析

李玉丹<sup>1</sup>,董平川<sup>1</sup>,张 荷<sup>2</sup>,雷 刚<sup>1</sup>,曹 耐<sup>1</sup>,吴子森<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院,北京 102249)

**摘要:**为了研究低渗透油藏在开发过程中伴随的储层物性及流体渗流参数变化规律,基于岩心堆积模型分形理论及材料力学原理,结合低渗透油藏非线性渗流特征,建立低渗透储层渗透率及启动压力梯度应力敏感理论计算模型,定量分析岩石力学参数对储层应力敏感性的影响,并通过理论模型计算结果与实验数据对比分析,验证应力敏感模型的有效性。研究表明:随着有效应力增加,渗透率呈下降趋势,而启动压力梯度呈上升趋势,且在有效应力作用下的正则化渗透率与启动压力梯度满足较好的乘幂关系;渗透率及启动压力梯度应力敏感性与岩石力学性质密切相关,岩石杨氏模量越大,渗透率及启动压力梯度应力敏感程度越弱,同一弹性模量的岩石泊松比越小,渗透率及启动压力梯度应力敏感程度越强;该模型可准确预测渗透率及启动压力梯度的应力敏感性,从而为低渗透油藏渗流规律研究及产能方案制定提供理论支撑。

**关键词:**低渗透油藏 应力敏感性 分形理论 渗透率 启动压力梯度

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0057-07

## Stress sensitivity analysis of permeability and threshold pressure gradient in low-permeability reservoir

Li Yudan<sup>1</sup>, Dong Pingchuan<sup>1</sup>, Zhang He<sup>2</sup>, Lei Gang<sup>1</sup>, Cao Nai<sup>1</sup>, Wu Zisen<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China;

2. Institute of Enhanced Oil Recovery, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** In order to study the variation of the rock physical property parameter and fluid flow parameter during the development of low-permeability reservoir, a new stress sensitivity predictive model for permeability and threshold pressure gradient in the low-permeability reservoir has been derived theoretically combined with the non-linear seepage feature based on the fractal theory of core accumulation model and mechanics of materials. The variation of permeability and threshold pressure gradient versus the effective stress with different mechanical parameters was quantitatively analyzed. Validity of the stress sensitivity model was verified through comparison between theoretical model result and those of available experimental data. The research results show that: the permeability decreases and the threshold pressure gradient increases as the effective stress increases, and the normalized permeability and threshold pressure gradient has a better power function relationship under the effective stress. Stress sensitivity of permeability and threshold pressure gradient is closely relative to the mechanical parameters of rock, higher Young's modulus presents a relative weaker stress sensitivity of permeability and threshold pressure gradient, and lower Poisson's ratio exhibits a more stress sensitive threshold pressure gradient and permeability under the same Young's modulus. The model could accurately predict the stress sensitivity of permeability and threshold pressure gradient, thereby offer a theoretical base and guide for flow rule research and design for production performance in the low-permeability reservoir.

收稿日期:2016-08-16。

作者简介:李玉丹(1992—),女,河北邢台人,在读博士研究生,从事油气田开发工程方面的研究。联系电话:13261968538, E-mail: 1533141753@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“裂缝性油气藏流固耦合渗流基础研究”(50004002)。

**Key words:** low-permeability reservoir; stress sensitivity; fractal theory; permeability; threshold pressure gradient

随着油气资源的不断利用,愈来愈多的低渗透油藏投入开发。低渗透储层特殊的孔喉结构特征,使得流体在多孔介质中的流动不同于在中、高渗透介质中的渗流规律,边界作用明显,启动压力梯度特征显著;同时低渗透油藏由于天然能量不足,存在较强的介质变形现象<sup>[1-4]</sup>。在油田开发过程中,随着流体不断采出,地层压力逐渐下降,储层岩石受压变形,微小孔道闭合,使得油藏孔隙度和渗透率下降,启动压力梯度增大,但大量研究表明孔隙度随应力变化较弱,在油藏工程实际应用中可以忽略,而渗透率和启动压力梯度随应力的动态变化对低渗透油藏渗流及产能影响极大<sup>[5-7]</sup>。

目前,中外对低渗透储层参数应力敏感理论模型研究较少。刘仁静等采用变径毛管束模型,对低渗透储层孔隙度及渗透率随应力变化规律进行了定量研究<sup>[8]</sup>;王厉强等采用不等径迂曲毛管束模型,根据弹性力学厚壁筒理论,对低渗透储层应力敏感性进行了定量分析<sup>[9]</sup>;雷刚等基于岩石颗粒排列方式及变形方式从应力敏感微观作用机制角度解释了低渗透储层应力敏感性<sup>[10]</sup>;曲占庆等通过对实验数据回归得到渗透率随应力变化规律,间接获得了启动压力梯度应力敏感模型<sup>[11]</sup>;刘丽从实验的角度对低渗透储层启动压力梯度的应力敏感性进行了分析,但缺少理论解释<sup>[12]</sup>。以上诸多学者的研究仅限于储层岩石物性参数(孔隙度、渗透率等)随应力变化规律,而对启动压力梯度应力敏感理论方面研究并不多,且同时考虑低渗透油藏渗透率及启动压力梯度随应力动态变化规律的理论模型更少。

在前人研究的基础上,笔者基于岩心堆积模型分形理论及材料力学原理,结合低渗透油藏非线性渗流特征,从岩石微观孔隙结构角度建立了全新的低渗透多孔介质渗透率及启动压力梯度应力敏感理论模型,对不同岩石力学参数下储层渗透率及启动压力梯度的应力敏感性进行了对比分析,从理论上对实验结果及规律进行了解释。

## 1 应力加载前后低渗透多孔介质分形特性

低渗透储层微观孔隙结构特征的精确表征对于应力敏感机理研究至关重要。然而多孔介质中岩石形成过程复杂,颗粒及孔隙数量多,尺度跨多个数量级,表现出严重无序特征,这种复杂结构特

性通常无法用传统的欧式几何加以精确描述。与传统的欧式几何相比,分形几何理论被广泛用于研究具有不规则特征的物体,且大量的研究已证明储层岩石颗粒及孔隙的无规则性具有良好的分形特征<sup>[13-16]</sup>。Katz等是最早将分形理论用于描述多孔介质孔隙结构自相似性的<sup>[14]</sup>,后来越来越多的学者将分形理论应用到石油领域中。

从分形几何的概念出发,将储层多孔介质做了简化处理。假设储层是由不同直径岩心聚集体及岩心间的孔隙空间(毛管)组合而成,岩心与毛管均具有良好的分形特性(图1)。

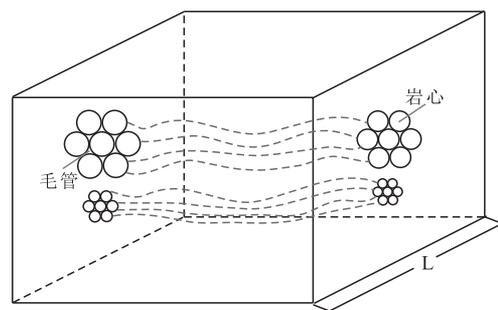


图1 不同直径岩心堆积模型示意

Fig.1 Schematic of a porous media composed by a bundle of tortuous core clusters with different diameters

### 1.1 岩心的分形特征

对于储层多孔介质,岩心累积数与岩心直径大小分布服从分形标度关系式<sup>[17]</sup>

$$N_c = \left( \frac{\lambda_{c\max}}{\lambda_c} \right)^{D_{ct}} \quad L \geq \lambda_c \quad (1)$$

在二维空间中有  $0 < D_{ct} < 2$ , 在三维空间中有  $0 < D_{ct} < 3$ ,  $D_{ct}$  的确定方法详见文献[18]。

由于多孔介质中岩心数目十分庞大,因此式(1)可以认为是一个连续可微函数。于是,在  $\lambda_c$  和  $\lambda_c + d\lambda_c$  区间里分布的岩心数目为

$$-dN_c = D_{ct} \lambda_{c\max}^{D_{ct}} \lambda_c^{-D_{ct}-1} d\lambda_c \quad (2)$$

当  $-dN_c > 0$  时,表明岩心数目随着岩心直径的增大而减少,这与实际相符。

由于岩心弯曲分布,其实际长度与表征长度有差别,通常  $L_c \geq L$ , 且实际长度与直径满足迂曲分形标度<sup>[19-20]</sup>,其表达式为

$$L_c = \lambda_c^{1-D_{ct}} L^{D_{ct}} \quad (3)$$

$D_{ct}$  的确定方法详见文献[18]。

### 1.2 毛管的分形特征

岩心堆积的孔隙空间即为毛管,由于毛管紧贴着岩心,所以其直径和长度分布与岩心的直径与长

度分布具有相似性,且满足的分形标度为

$$\lambda_p = F\lambda_c \quad (4)$$

$$L_p \approx L_c \quad (5)$$

因毛管由岩心堆积而成,故认为毛管长度近似等于岩心长度,同根毛管在长度分布上直径不变。

### 1.3 应力加载后岩心及毛管的分形特征

当岩心处于初始状态即应力为0时,岩心的分形特征,即式(2)和式(3)分别变形为

$$-dN_c = D_{cf} \lambda_{c \max 0}^{D_{cf}} \lambda_{c0}^{-(D_{cf}+1)} d\lambda_{c0} \quad (6)$$

$$L_{c0} = \lambda_{c0}^{1-D_{cf}} L_0^{D_{cf}} \quad (7)$$

岩心开始加压后所受应力不再为0,将要发生变形,由材料力学基础知识并结合虎克定律认为,岩心径向受压后只是大小发生变化而形状不变,轴向岩心长度相应地会被拉长<sup>[18]</sup>。

径向变化表征式<sup>[21]</sup>为

$$\lambda_c = \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) \lambda_{c0} \quad (8)$$

轴向变化表征式<sup>[21]</sup>为

$$L_c = \left(1 - \frac{\sigma}{\nu E}\right) L_{c0} \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)中,则多孔介质中岩心长度随应力变化可表征为

$$L_c = \left(1 - \frac{\sigma}{\nu E}\right) \lambda_{c0}^{1-D_{cf}} L_0^{D_{cf}} \quad (10)$$

毛管变形是因为岩心发生变形而引起的,所以毛管在有效应力作用下的径向分形特征可表示为

$$\lambda_p = F\lambda_c = F\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) \lambda_{c0} \quad (11)$$

毛管在有效应力作用下的轴向分形特征可表示为

$$L_p \approx L_c = \left(1 - \frac{\sigma}{\nu E}\right) \lambda_{c0}^{1-D_{cf}} L_0^{D_{cf}} \quad (12)$$

在应力作用下,多孔介质横截面的总面积可表示为

$$A = L^2 = -\int_{\lambda_{c \min 0}}^{\lambda_{c \max 0}} \sqrt{3} \lambda_c^2 dN_c \quad (13)$$

$\lambda_{c \max 0}$  和  $\lambda_{c \min 0}$  确定方法详见文献[19]。

将式(6)和式(8)代入式(13)中,则在应力作用下多孔介质横截面积可表示为

$$A = \sqrt{3} \frac{1}{2-D_{cf}} D_{cf} \lambda_{c \max 0}^2 \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right)^2 \left(1 - \delta^{2-D_{cf}}\right) \quad (14)$$

其中,  $\delta = \lambda_{c \min 0} / \lambda_{c \max 0}$ , 即初始状态最小岩心直径与最大岩心直径的比值。

由式(14)整理后得

$$L = \sqrt{A} = \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) \lambda_{c \max 0} \left[ \sqrt{3} D_{cf} \frac{1}{2-D_{cf}} \left(1 - \delta^{2-D_{cf}}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

初始状态下,多孔介质横截面积及表征长度可表示为

$$A_0 = \sqrt{3} \frac{1}{2-D_{cf}} D_{cf} \lambda_{c \max 0}^2 \left(1 - \delta^{2-D_{cf}}\right) \quad (16)$$

$$L_0 = \lambda_{c \max 0} \left[ \sqrt{3} D_{cf} \frac{1}{2-D_{cf}} \left(1 - \delta^{2-D_{cf}}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

## 2 模型的建立

模型假设条件为:①在低渗透油藏中流体为单相塑性流体,流动为塑性流动,具有一定的屈服应力值;②岩石渗透率及流体启动压力梯度随应力变化;③渗流为非线性渗流,考虑启动压力梯度及介质变形的影响;④流体在单根毛管中流动满足 Buclingham-Reibe 方程,在整个平面上的流动服从带有启动压力梯度的线性表达式;⑤整个渗流过程为等温过程,不考虑温度变化影响。

### 2.1 渗透率应力敏感模型

由于低渗透油藏特殊的孔喉结构特征,使得流体在细小孔道中流动时呈现出非牛顿流动特性,可以将其中的非牛顿流体看成是具有一定屈服应力的塑性流体,根据 Buclingham-Reibe 方程<sup>[22-23]</sup>,则塑性流体在单根毛管中的流动为

$$q_i = \frac{\pi \lambda_p^4}{128 \mu L_p} \left[ \Delta p - \frac{4}{3} \times \frac{4L_p \tau_0}{\lambda_p} + \frac{1}{3} \left( \frac{4L_p}{\lambda_p} \right)^4 \tau_0^4 \frac{1}{\Delta p^3} \right] \quad (18)$$

当  $\Delta p \gg \tau_0$  时,  $\tau_0^4 \frac{1}{\Delta p^3} \rightarrow 0$ , 则式(18)可以简化为

$$q_i = \frac{\pi \lambda_p^4}{128 \mu L_p} \left( \Delta p - \frac{16}{3} \times \frac{L_p \tau_0}{\lambda_p} \right) \quad (19)$$

将式(11)和式(12)代入式(19)中,则单根毛管中流量可表示为

$$q_i = \frac{\pi F^4 \Delta p \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right)^4 \lambda_{c0}^{3+D_{cf}}}{128 \mu L_0^{D_{cf}} \left(1 - \frac{\sigma}{\nu E}\right)} - \frac{\pi F^3}{24 \mu} \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right)^3 \lambda_{c0}^3 \tau_0 \quad (20)$$

由于岩心及毛管大小连续分布,则整个分形体内总流量可表示为

$$Q = -\int_{\lambda_{c \min 0}}^{\lambda_{c \max 0}} q_i dN_c \quad (21)$$

将式(6)和式(20)代入式(21)中,则毛管中总流量可表示为

低渗透储层中流体在整个平面上的流动由含有启动压力梯度的线性表达式为<sup>[24]</sup>

$$Q = \frac{\pi F^4 D_{cf} \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right)^4 \lambda_{c \max 0}^{3+D_{cf}} \left(1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}\right)}{128 \left(1 - \frac{\sigma}{vE}\right) (3 + D_{cf} - D_{cf}) L_0^{D_{cf}-1}} \times \frac{1}{\mu} \times \left( \frac{\Delta p}{L_0} - \frac{16}{3F} \times \frac{1 - \frac{\sigma}{vE}}{1 + \frac{\sigma}{E}} \times \frac{3 + D_{cf} - D_{cf}}{3 - D_{cf}} \times \frac{L_0^{D_{cf}-1}}{\lambda_{c \max 0}^{D_{cf}}} \times \frac{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}}{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}} \tau_0 \right) \quad (22)$$

$$Q = \frac{KA}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L_0} - G \right) \quad (23)$$

根据等效渗流阻力原理,式(22)与式(23)联立相等,结合式(14)可得低渗透油藏在有效应力作用下渗透率的分形表达式<sup>[24]</sup>为

$$K = \frac{\pi F^4}{128\sqrt{3}} \times \frac{2 - D_{cf}}{3 + D_{cf} - D_{cf}} \times L_0^{1-D_{cf}} \lambda_{c \max 0}^{1+D_{cf}} \times \left( \frac{1 + \frac{\sigma}{E}}{1 - \frac{\sigma}{vE}} \right)^2 \times \frac{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}}{1 - \delta^{2-D_{cf}}} \quad (24)$$

初始状态储层渗透率的分形表达式为

$$K_0 = \frac{\pi F^4}{128\sqrt{3}} \times \frac{2 - D_{cf}}{3 + D_{cf} - D_{cf}} \times \frac{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}}{1 - \delta^{2-D_{cf}}} L_0^{1-D_{cf}} \lambda_{c \max 0}^{1+D_{cf}} \quad (25)$$

$K_0$ 与Yu等提出的牛顿流体在多孔介质中渗流的渗透率表达式相吻合<sup>[19]</sup>。正则化渗透率表示为

$$K^+ = \frac{K}{K_0} \quad (26)$$

将式(24)和式(25)代入式(26),则正则化渗透率可表示为

$$K^+ = \left( \frac{1 + \frac{\sigma}{E}}{1 - \frac{\sigma}{vE}} \right)^2 \quad (27)$$

## 2.2 启动压力梯度应力敏感模型

在低渗透油藏开发过程中,地层压力逐渐下降,岩石骨架所受有效应力增加,孔喉缩小,流体渗流阻力增大,使得启动压力梯度随应力发生变化,具有应力敏感性。

在式(22)与式(23)联立相等的过程中,也可得到低渗透油藏非达西渗流启动压力梯度在有效应力作用下分形表达式为

$$G = \frac{16}{3F} \times \frac{1 - \frac{\sigma}{vE}}{1 + \frac{\sigma}{E}} \times \frac{3 + D_{cf} - D_{cf}}{3 - D_{cf}} \times \frac{L_0^{D_{cf}-1}}{\lambda_{c \max 0}^{D_{cf}}} \times \frac{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}}{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}} \tau_0 \quad (28)$$

则初始状态下的流体启动压力梯度的分形表达式为

$$G_0 = \frac{16}{3F} \times \frac{3 + D_{cf} - D_{cf}}{3 - D_{cf}} \times \frac{L_0^{D_{cf}-1}}{\lambda_{c \max 0}^{D_{cf}}} \times \frac{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}}{1 - \delta^{3+D_{cf}-D_{cf}}} \tau_0 \quad (29)$$

$G_0$ 与Cai提出的低渗透非达西渗流启动压力梯度表达式相吻合<sup>[25]</sup>。

正则化启动压力梯度的表达式为

$$G^+ = \frac{G}{G_0} \quad (30)$$

将式(28)和式(29)代入式(30),则正则化启动压力梯度表示为

$$G^+ = \frac{1 - \frac{\sigma}{vE}}{1 + \frac{\sigma}{E}} \quad (31)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 模型验证

为了验证所建立的应力敏感模型的准确性,获取西部某低渗透油田3块岩心用于应力敏感实验,岩心参数见表1。应用应力敏感模型即式(27)和式(31)分别计算不同有效应力下的正则化渗透率以及启动压力梯度,并与实验结果进行对比(图2,图3)。

表1 实验测试岩心的基本参数  
Table1 Basic parameters of experimental cores

岩心 编号	直径/cm	初始平均 孔隙度	初始渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	弹性模量/ 10 <sup>3</sup> MPa	泊松比
1	2.47	0.11	0.37	5.00	0.04
2	2.48	0.10	1.30	5.45	0.06
3	2.50	0.11	4.81	5.95	0.10

从图2和图3可以看出:理论模型计算结果与实验结果基本吻合,验证了新建的应力敏感模型的有效性和适用性。由图2和图3可知,渗透率随着有效应力的增大而减小,但随着有效应力的增大,启动压力梯度呈上升趋势。主要原因是当岩石承受有效应力增加,多孔介质孔喉变形缩小,流体通过能力下降,导致岩石渗透率降低,同时多孔介质孔喉变形缩小增大了渗流边界层在渗流通道中所占比例,增加了流体在孔喉中渗流阻力,导致渗流所需启动压力梯度增大。因此,在井网部署计算合理井距及产能评价时,不仅要考虑渗透率的动态变化,还要充分考虑地层压力下降对启动压力梯度的影响。

由正则化启动压力梯度与正则化渗透率关系曲线(图4)可见,在有效应力作用下,储层正则化启动压力梯度随正则化渗透率的减小而增大,且3块

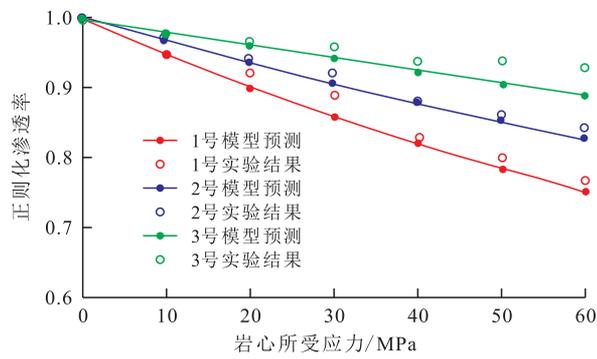


图2 渗透率应力敏感模型实验验证

Fig.2 Experimental verification of the permeability stress sensitivity model

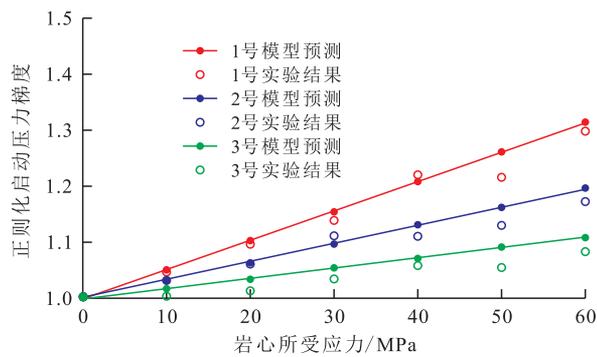


图3 启动压力梯度应力敏感模型实验验证

Fig.3 Experimental verification of the threshold pressure gradient stress sensitivity model

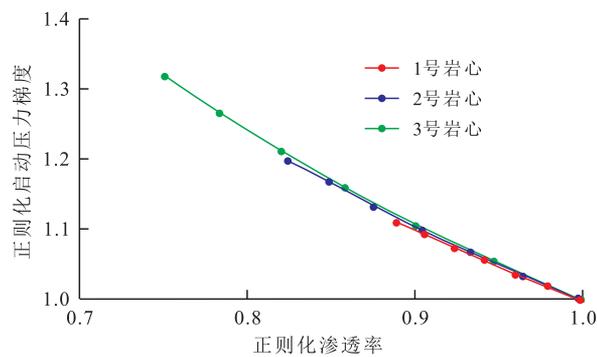


图4 正则化启动压力梯度与正则化渗透率关系曲线

Fig.4 Relation curve of the normalized threshold pressure gradient and the normalized permeability

岩心变化趋势基本一致。对图中3条曲线用幂指数关系进行拟合,可以看出,用所建模型预测的正则化启动压力梯度与正则化渗透率呈现良好的幂函数关系,且幂指数接近于-1。这与传统的不考虑应力敏感影响的启动压力梯度与渗透率满足乘幂关系吻合,验证了新建立的应力敏感模型有效性。

### 3.2 参数敏感性分析

由于地层压力下降,储层岩石骨架是应力的主要承受者,岩石的力学性质对储层应力敏感程度有很大影响。为了研究不同岩石力学参数下储层的应力敏感性,首先分别取岩石杨氏模量为 $4 \times 10^3$ , $5 \times$

$10^3$ , $6 \times 10^3$  MPa,泊松比为0.04,在不同有效应力作用下,用所建模型计算得到正则化渗透率和正则化启动压力梯度与有效应力的关系(图5)。

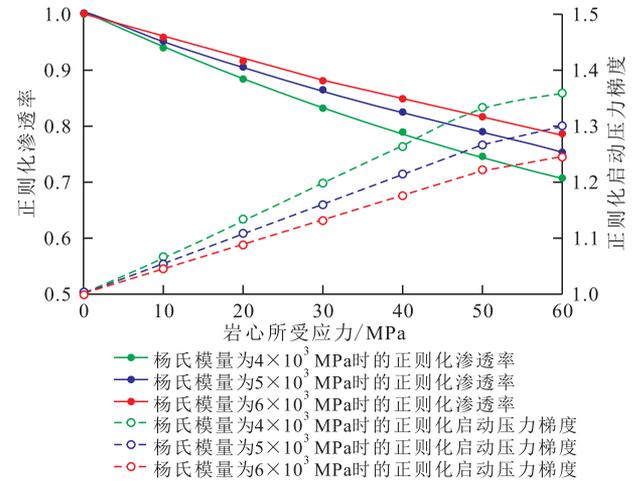


图5 不同弹性模量下渗透率及启动压力梯度应力敏感性

Fig.5 Normalized permeability and threshold pressure gradient of porous media versus the effective stress at different Young's modulus

从图5可见,随着有效应力增加,渗透率逐渐减小,启动压力梯度逐渐增大;不同岩石弹性模量下,低渗透油藏多孔介质的渗透率及启动压力梯度应力敏感程度不同:岩石弹性模量越大,渗透率及启动压力梯度随有效应力变化幅度越小,储层应力敏感程度越弱,反之亦然。这是由于岩石弹性模量越大,表示储层岩石的可压缩性程度越低,多孔介质变形量越小,不论是渗透率还是启动压力梯度受到的影响也越小,对应储层的应力敏感程度较弱。

由同一弹性模量不同泊松比下,低渗透油藏渗透率及启动压力梯度随应力变化趋势(图6)可以看出,岩石泊松比对低渗透储层渗透率及启动压力梯

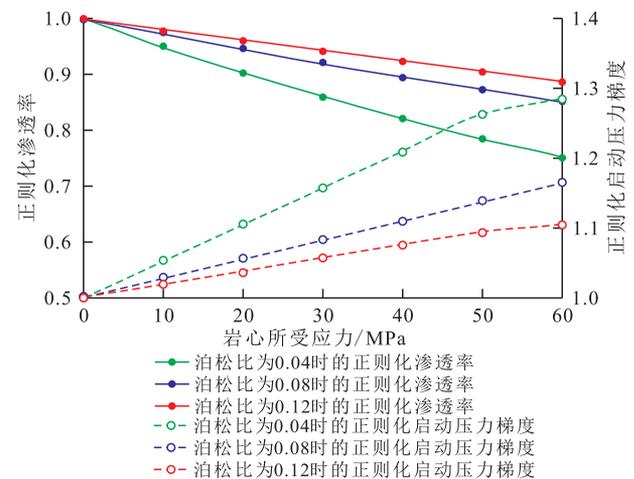


图6 不同泊松比下渗透率及启动压力梯度应力敏感性

Fig.6 Normalized permeability and threshold pressure gradient of porous media versus the effective stress at different Poisson's ratios

度的应力敏感性与弹性模量影响非常相似:随着有效应力的增加,在相同的弹性模量下,岩石泊松比越小,储层渗透率及启动压力梯度随有效应力变化程度越大,即正则化渗透率越小,正则化启动压力梯度越大,对应储层应力敏感性越强。主要因为岩石的泊松比是衡量岩石横向变形系数,同一弹性模量的岩石泊松比越大,表明岩石受压伸长,迂曲度减小,流体渗流阻力增加幅度相对较小,渗透率及启动压力梯度变化较小,储层应力敏感程度较弱。

分析结果表明,岩石的力学参数(弹性模量、泊松比)对储层渗透率及启动压力梯度应力敏感程度影响极大,说明外界有效应力的改变引起了多孔介质的应力敏感性,但岩石自身性质决定了油藏应力敏感性强弱。

## 4 结论

基于岩心堆积模型分形理论及材料力学原理,考虑了低渗透储层非线性渗流特征,建立了低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感理论模型。通过分析不同岩石力学参数下储层的应力敏感性发现,低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感性与岩石力学参数密切相关,且岩石弹性模量越大,储层岩石可压缩性程度越低,多孔介质变形量越小,渗透率及启动压力梯度应力敏感程度越弱;同一弹性模量岩石泊松比越小,渗透率及启动压力梯度变化幅度越大,储层对应的应力敏感程度越强,反之亦然。新建模型考虑了低渗透储层渗透率及启动压力梯度随应力变化规律,且结构较为简单,可准确预测储层的渗透率及启动压力梯度应力敏感性,因此,可以为低渗透油藏渗流规律研究及产能方案制定提供理论支撑。

### 符号解释:

$N_c$ ——累积岩心数目,根;  $L$ ——表征长度, m;  $\lambda_c$ ——多孔介质中岩心直径, m;  $D_d$ ——岩心直径分形维数, 表征岩心分布复杂程度和非均匀程度;  $L_c$ ——岩心实际长度, m;  $D_{Cr}$ ——岩心迂曲分形维数, 表征岩心的弯曲程度;  $\lambda_p$ ——毛管直径, m;  $F$ ——形状因子;  $L_p$ ——毛管长度, m;  $\lambda_{c_{max0}}$ ——初始最大岩心直径, m;  $\lambda_{c0}$ ——初始岩心直径, m;  $L_{c0}$ ——初始岩心长度, m;  $L_0$ ——初始表征长度, m;  $\sigma$ ——岩心所受应力, 为负值, MPa;  $E$ ——岩心弹性模量, MPa;  $\nu$ ——岩心的泊松比;  $A$ ——多孔介质横截面积,  $m^2$ ;  $\lambda_{c_{min0}}$ ——初始状态最小岩心直径, m;  $A_0$ ——初始状态多孔介质横截面积,  $m^2$ ;  $q_i$ ——多孔介质中单根毛管中的流量,

$m^3/s$ ;  $\mu$ ——流体粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $\Delta p$ ——生产压差, MPa;  $\tau_0$ ——屈服应力, MPa;  $Q$ ——多孔介质总流量,  $m^3/s$ ;  $K$ ——多孔介质渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $G$ ——启动压力梯度, MPa/m;  $K_0$ ——多孔介质在初始状态下的渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $K^+$ ——正则化渗透率;  $G_0$ ——初始状态流体启动压力梯度, MPa/m;  $G^+$ ——正则化启动压力梯度。

### 参考文献:

- [1] 窦祥曦, 廖新维, 赵晓亮, 等. 应力敏感微纳米孔隙储层压裂裂缝反演方法[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 76-82.  
Dou Xiangji, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. Inversion method for hydraulic fracture in stress-sensitive formation with micro-nano pores[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 76-82.
- [2] 雷刚, 王昊, 董平川, 等. 非均质致密砂岩应力敏感性的定量表征[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 90-94.  
Lei Gang, Wang Hao, Dong Pingchuan, et al. Quantitative analysis on stress sensitivity of heterogeneous tight sandstone[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 90-94.
- [3] 孟阳. WHZ 油田致密储层微观特征及介质变形敏感实验[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 95-99.  
Meng Yang. Microscopic characteristics and sensitivity experiment of medium deformation in the tight reservoirs of WHZ oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 95-99.
- [4] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 232-236.  
Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xianguai, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-236.
- [5] 田冷, 何顺利, 李秀生. 低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(6): 89-92.  
Tian Leng, He Shunli, Li Xiusheng. Study of well test of stress-sensitive sandstone in low permeability gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 89-92.
- [6] 王欣, 齐梅, 胡永乐. 西加盆地 B 气田致密砂岩储层应力敏感评价[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 85-88.  
Wang Xin, Qi Mei, Hu Yongle. Evaluation on stress sensitivity of tight sandstone in B gasfield of western Canada basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 85-88.
- [7] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 特低渗透应力敏感油藏数值模拟历史拟合方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2): 73-76.  
Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. History matching method of the numerical simulation for stress-sensitivity extra-low-permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(2): 73-76.
- [8] 刘仁静, 刘慧卿, 张红玲, 等. 低渗透储层应力敏感性及其对石油开发的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2 697-2 702.  
Liu Renjing, Liu Huiqing, Zhang Hongling, et al. Study of stress sensitivity and its influence on oil development in low permeability reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-

- ing, 2011, 30(Supplement1): 2 697-2 702.
- [9] 王厉强, 刘慧卿, 甄思广, 等. 低渗透储层应力敏感性定量解释研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 96-99.  
Wang Liqiang, Liu Huiqing, Zhen Siguang, et al. Quantitative research on stress sensitivity of low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 96-99.
- [10] 雷刚, 董平川, 杨书, 等. 基于岩石颗粒排列方式的低渗透储层应力敏感性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 209-214.  
Lei Gang, Dong Pingchuan, Yang Shu, et al. Study of stress-sensitivity of low-permeability reservoir based on arrangement of particles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 209-214.
- [11] 曲占庆, 翟恒立, 田相雷, 等. 考虑压敏效应的变启动压力梯度试验研究[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 78-82.  
Qu Zhanqing, Zhai Hengli, Tian Xianglei, et al. Experimental research on variable threshold pressure gradient considering pressure sensitive effect[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 78-82.
- [12] 刘丽. 低渗透油藏启动压力梯度的应力敏感性实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 81-83.  
Liu Li. Laboratory study on stress sensitivity of threshold pressure gradient in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 81-83.
- [13] Pfeifer P, Avnir D. Chemistry in noninteger dimensions between two and three[J]. The Journal of Chemical Physics, 1983, 79(7): 3 369-3 558.
- [14] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and formation[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(3): 1 325-1 328.
- [15] Krohn Christine E. Sandstone fractal and Euclidean pore volume distributions[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(B4): 3 286-3 296.
- [16] Krohn Christine E. Fractal measurements of sandstone, shales and carbonates[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(B4): 3 297-3 305.
- [17] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman W H, 1982.
- [18] Tan X H, Li X P, Liu J Y, et al. Study of the effects of stress sensitivity on the permeability and porosity of fractal porous media[J]. Physics Letters A, 2015, 379(39): 2 458-2 465.
- [19] Yu B M, Cheng P. A fractal model for permeability of bi-dispersed porous media[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2002, 45(14): 2 983-2 993.
- [20] Costal A. Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore space geometry assumption[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(2): L02318.
- [21] Hibbeler R R. Mechanics of materials[M]. Canada: Prentice Hall, 1997.
- [22] Губин В. Е. Pipeline transportation of high-viscosity and high-freezing base oil and finished oil[M]. Chen Zuze, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987.
- [23] 陈宗淇, 戴闽光. 胶体化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981: 379-394.  
Chen Zongqi, Dai Minguang. Colloidal chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1981: 379-394.
- [24] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 59-99.  
Huang Yanzhang. Fluid mechanics in low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 59-99.
- [25] Cai J C. A fractal approach to low velocity non-Darcy flow in a low permeability porous medium[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(4): 1-5.

编辑 王星

## 欢迎订阅 2017 年《石油实验地质》期刊

《石油实验地质》是一份报道我国油气普查、勘探及开发成果,反映我国石油地质研究水平的学术性、技术性刊物。本刊紧密结合我国石油工业的发展战略,以石油工业上游所涉及的油气勘探的热点、难点问题为重点进行报道和分析,同时重点报道国内外油气实验测试的最新技术和方法。本刊为中文核心期刊,2016年版中国科技期刊引证报告(扩刊版)统计的影响因子达2.419,已被美国“化学文摘(CA)”、“石油文摘(PA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”和“中国石油文摘”、“中国地质文摘”、“中国学术期刊文摘”等收录,是“中国科学引文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科技论文统计源”来源期刊,并全文收录于“中国期刊网”、“中国知网”、“万方数据”及“维普中文科技期刊数据库”中。

《石油实验地质》为双月刊,逢单月28日出版。每本定价20元,全年120元。在校学生半价优惠。

通信地址:江苏无锡市蠡湖大道2060号《石油实验地质》编辑部

邮编:214126 电话:(0510)68787203

电子邮箱:sysydz.syky@sinopec.com

网址:http://www.sysydz.net

开户行:中国建设银行股份有限公司无锡分行营业部

帐号:32001618636052516631