



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103775078 A

(43) 申请公布日 2014. 05. 07

(21) 申请号 201410051468. 3

(22) 申请日 2014. 02. 14

(71) 申请人 武汉科技大学

地址 430080 湖北省武汉市青山区和平大道
947 号

(72) 发明人 员美娟

(74) 专利代理机构 广州华进联合专利商标代理
有限公司 44224

代理人 李永华

(51) Int. Cl.

E21B 49/08 (2006. 01)

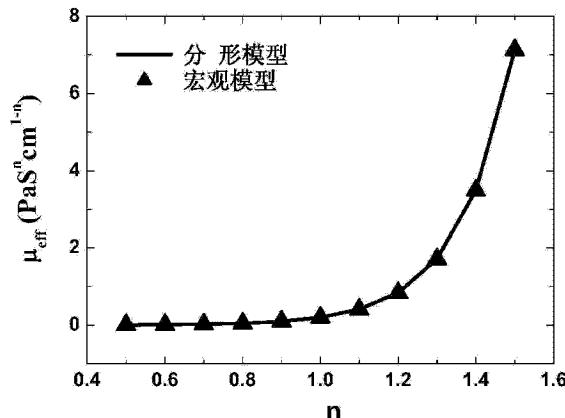
权利要求书1页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方
法

(57) 摘要

一种幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预
测方法,包括如下步骤:提供多孔介质的样本,测
量多孔介质的孔隙度(ϕ)和颗粒半径(R);根据
多孔介质的孔隙度(ϕ)和颗粒半径(R)计算多孔
介质在分形模型中的结构参数,结构参数包括最
小孔隙半径(r_{\min})、最大孔隙半径(r_{\max})、毛细管的
直线长度(L_0)、流体路径的弯曲度(Γ)、毛细管的
迂曲度分形维数(D_T)、孔隙分形维数(D_f);测量幂
律流体的特性参数,特性参数包括幂律流体的粘
度(μ)及幂指数(n);根据多孔介质的结构参数
及幂律流体的特性参数计算幂律流体的有效粘度
(μ_{eff})。上述预测方法可有效预测幂律流体在多
孔介质中的有效粘度,并且有助于地下石油开采。



1. 一种幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法, 所述幂律流体的本构方程为:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n;$$

其中, μ 为所述幂律流体的粘度, $\dot{\gamma}$ 是剪切速率, n 是幂指数;

其特征在于, 所述预测方法包括如下步骤:

步骤 a, 提供所述多孔介质的样本, 测量所述多孔介质的孔隙度 (ϕ) 和颗粒半径 (R);

步骤 b, 根据所述多孔介质的孔隙度 (ϕ) 和颗粒半径 (R) 计算所述多孔介质在分形模型中的结构参数, 所述结构参数包括最小孔隙半径 (r_{\min})、最大孔隙半径 (r_{\max})、毛细管的直线长度 (L_0)、流体路径的弯曲度 (Γ)、毛细管的迂曲度分形维数 (D_T)、孔隙分形维数 (D_f), 其分别由如下公式计算得出:

$$r_{\max} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\phi}{1-\phi}};$$

$$\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{\sqrt{2(1-\phi)}}{24};$$

$$L_0 = R \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}(1-\phi)}};$$

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + \sqrt{1-\phi} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}} - 1\right)^2 + \frac{1}{4}}{1 - \sqrt{1-\phi}}} \right];$$

$$D_T = 1 + \frac{\ln \Gamma}{\ln \frac{L_0}{2r_{\min}}};$$

$$r_{\min} = \frac{D_f r_{\min}}{D_f - 1} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}} \right)^{D_f - 1} \right];$$

$$D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \frac{r_{\min}}{r_{\max}}};$$

步骤 c, 测量所述幂律流体的特性参数, 所述特性参数包括所述幂律流体的粘度 (μ) 及幂指数 (n);

步骤 d, 根据所述多孔介质的结构参数及所述幂律流体的特性参数按照如下公式计算所述幂律流体的有效粘度 (μ_{eff}):

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu \left[\left(3 + \frac{1}{n} \right) \left(3 + \frac{D_T}{n} - D_f \right) \right]^n}{4 \left(3 + D_T - D_f \right)} \cdot \frac{\left\{ \frac{r_{\max}^{D_T} \phi (3 - D_T - D_f) 2^{D_T - 1}}{L_0^{D_T - 1} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}} \right)^{3 - D_T - D_f} \right]} \right\}^{1-n}}{.$$

幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法

【技术领域】

[0001] 本发明涉及一种原油在多孔介质(地下岩石)中的有效粘度的预测方法,特别是涉及一种幂律流体型的原油在多孔介质(地下岩石)中的有效粘度的预测方法。

【背景技术】

[0002] 多孔介质可分为天然多孔介质和人造多孔介质。天然多孔介质又分为地下多孔介质和生物多孔介质,前者如岩石和土壤;后者如人体和动物体内的微细血管网络和组织间隙以及植物体的根、茎、枝、叶等。

[0003] 多孔介质内部的孔隙极其微小。储集石油和天然气的砂岩地层的孔隙直径大多在不足1微米到500微米之间;毛细血管内径一般为5~15微米;肺泡-微细支气管系统的孔隙直径一般为200微米左右或更小;植物体内输送水分和糖分的孔隙直径一般不大于40微米。

[0004] 多孔介质的孔隙度(孔隙率)为多孔介质内的微小空隙的总体积与该多孔介质的外表体积的比值。在常见的非生物多孔介质中,鞍形填料和玻璃纤维等的孔隙度最大达83%~93%;煤、混凝土、石灰石和白云石等的孔隙度最小,可低至2%~4%;与地下流体资源等能源、资源有关的砂岩的孔隙度大多为12%~30%,土壤的孔隙度为43%~54%,砖的孔隙度为12%~34%,皮革的孔隙度为56%~59%,均属中等数值;动物的肾、肺、肝等脏器的血管系统的孔隙度亦为中等数值。孔隙度是影响多孔介质内流体容量和流体渗流状况的重要参量。

[0005] 多孔介质中流入不同的流体时,其浸润性不同,所谓湿润性为在固体和两种流体(两种非互溶液体或液体与气体)的三相接触面上出现的流体浸润固体表面的一种物理性质。浸润现象是三相的表面分子层能量平衡的结果。表面层的能量通常用极性表示,浸润性也可用固体液体之间的极性差来表示。极性差愈小,就愈易浸润。例如,金属表面的极性较小,水的极性比油脂的极性大,金属表面往往容易被油湿而不易被水湿,因此可称金属具有亲油性或憎水性;玻璃和石英的表面极性较大,容易被水浸润而不易被油脂浸润,因此可称玻璃和石英具有亲水性或憎油性。

[0006] 在一定条件下,浸润性与温度、压力等因素有关。流体的性质等因素也可能影响固体表面的浸润性。例如,含有表面活性物质的流体与固体表面接触后,可能改变后者的浸润性。有些固体表面的浸润性呈现复杂的状态,例如,由于曾经与不同的液体接触,在同一块储油岩石上可能出现亲油表面和亲水表面同时存在的现象。

[0007] 浸润性对多孔介质中流体运动的规律及有关的生产过程有重要影响。例如,储油岩石的浸润性不同,则渗流力学计算方法、油田开发原则和生产控制措施都不同。

[0008] 多孔介质中存在毛细管压力,即,多孔介质的微小空隙中的任何两种非互溶流体分界面的两侧存在的压力差,即非浸润相的压力与浸润相的压力之差。毛细管压力取决于流体的表面张力、浸润角和界面的曲率。在流体互相驱替过程中,毛细管压力可以是驱动力,也可以是流动的阻力。浸润相在毛细管压力作用下,可以自发地驱替非浸润相,即渗汲

作用。毛细管压力的存在影响多孔介质内的流体运动规律,因此是渗流力学及有关的工程技术必须考虑的问题。例如,在油田开发中,毛细管压力影响油层的有效渗透率和油层的采收率;利用毛细管压力曲线可确定多孔介质内的孔隙分布和流体分布,计算多孔介质的相渗透率以及油层的采收率等。

[0009] 渗透率为多孔介质的一个较为重要的结构参数,表示多孔介质渗透性强弱的量。多孔介质允许流体通过相互连通的微小空隙流动的性质称为渗透性。常见的多孔介质均具有一定的渗透性。渗透率与多孔介质的另一物理性质——孔隙度之间不存在固定的函数关系,而与孔隙大小及其分布等因素有直接关系。渗透率值由达西渗流定律确定。物理系统的渗透率计量单位为平方厘米,而工程上常用达西和千分达西,即千分之一达西。一个达西等于 9.8697×10^{-9} 平方厘米。具有工业价值的砂岩油层的绝对渗透率值从几个到 3000 千分达西,大多数砂岩油层的渗透率为 $200 \sim 1000$ 千分达西;砖的渗透率为 $5 \sim 220$ 千分达西;土壤的渗透率一般为 $0.29 \sim 14$ 达西。

[0010] 渗透率可分三类:绝对渗透率,是通常以空气通过多孔介质测定的渗透率值;有效渗透率,是考虑了流体性质及其运动特征的渗透率,例如,二相或多相流体渗流时,多孔介质对每一相流体的渗透率总是小于绝对渗透率,称为相渗透率;相对渗透率,即相渗透率与绝对渗透率的比值。相渗透率由多相渗流的达西公式计算。实验证明,相渗透率值与该相流体在空隙中所占的体积百分比即该相的饱和度等因素有关。相对渗透率与饱和度之间的关系曲线称为多孔介质的相对渗透率曲线。

[0011] 液体在多孔介质中流动时,在其分子间产生内摩擦的性质,称为液体的黏性,粘性的大小用黏度表示,是用来表征液体性质相关的阻力因子。粘度又分为动力粘度、运动粘度和条件粘度。然而,即使在静态条件下测量同一种非牛顿流体,也可以得到一系列不同的粘度值,这一粘度值称为非牛顿流体的有效粘度。

[0012] 石油开采与地下岩石的流体的有效粘度有密切相关的关系,石油是一种非牛顿流体,例如,幂律流体。因此,研究幂律流体的流体特性对石油开采有重要意义。目前,已经有相关研究成果,例如,中国海洋石油总公司、中国石油研究中心共同申请的申请号为 CN200910079566.7、发明名称为“一种偏心圆管环空幂律流体流态的测算方法”的中国专利。

[0013] 然而,目前没有能够有效预测幂律流体在多孔介质中的有效粘度的方法,从而难以根据实时变化的有效粘度调整采油的压力,以提高采油效率。

【发明内容】

[0014] 鉴于上述状况,有必要提供一种能够有效预测幂律流体的有效粘度的预测方法。

[0015] 一种幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法,所述幂律流体的本构方程为:

$$[0016] \tau = \mu \dot{\gamma}^n;$$

[0017] 其中, μ 为所述幂律流体的粘度, $\dot{\gamma}$ 是剪切速率, n 是幂指数;

[0018] 所述预测方法包括如下步骤:

[0019] 步骤 a, 提供所述多孔介质的样本, 测量所述多孔介质的孔隙度(Φ)和颗粒半径(R);

[0020] 步骤 b, 根据所述多孔介质的孔隙度 (ϕ) 和颗粒半径 (R) 计算所述多孔介质在分形模型中的结构参数, 所述结构参数包括最小孔隙半径 (r_{\min})、最大孔隙半径 (r_{\max})、毛细管的直线长度 (L_0)、流体路径的弯曲度 (Γ)、毛细管的迂曲度分形维数 (D_T)、孔隙分形维数 (D_f), 其分别由如下公式计算得出 :

$$[0021] r_{\max} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\phi}{1-\phi}};$$

$$[0022] \frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{\sqrt{2(1-\phi)}}{24};$$

$$[0023] L_0 = R \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}(1-\phi)}};$$

$$[0024] \Gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + \sqrt{1-\phi} \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}} - 1\right)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1-\phi}} \right];$$

$$[0025] D_T = 1 + \frac{\ln \Gamma}{\ln \frac{L_0}{2r_{av}}};$$

$$[0026] r_{av} = \frac{D_f r_{\min}}{D_f - 1} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}} \right)^{D_f - 1} \right];$$

$$[0027] D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \frac{r_{\min}}{r_{\max}}};$$

[0028] 步骤 c, 测量所述幂律流体的特性参数, 所述特性参数包括所述幂律流体的粘度 (μ) 及幂指数 (n) ;

[0029] 步骤 d, 根据所述多孔介质的结构参数及所述幂律流体的特性参数按照如下公式计算所述幂律流体的有效粘度 (μ_{eff}) :

$$[0030] \mu_{\text{eff}} = \frac{\mu \left[\left(3 + \frac{1}{n} \right) \left(3 + \frac{D_T}{n} - D_f \right) \right]^n}{4 \left(3 + D_T - D_f \right)} \cdot \left\{ \frac{r_{\max}^{D_T} \phi (3 - D_T - D_f) 2^{D_T - 1}}{L_0^{D_T - 1} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}} \right)^{3 - D_T - D_f} \right]} \right\}^{1-n}.$$

[0031] 上述预测方法根据多孔介质的结构参数及流体的特性参数, 可预测幂律流体在多孔介质中的有效粘度, 当幂律流体的特性参数变化时, 可随之预测对应的有效粘度。并且, 上述预测方法不含任何经验常数, 所有参数都有明确的物理意义, 因此预测的结果较为准确。因此, 上述预测方法可有效预测幂律流体在多孔介质中的有效粘度, 并且有助于地下石油开采。

【附图说明】

[0032] 图 1 为本发明的幂律流体在多孔介质中的平均流速分形模型与网络模拟数据的

比较分析图；

[0033] 图 2 为本发明的幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法与研究者 Balhoff 和 Thompson 的宏观模型的比较分析图。

【具体实施方式】

[0034] 为了便于理解本发明，下面将参照相关附图对本发明进行更全面的描述。附图中给出了本发明的较佳的实施例。但是，本发明可以以许多不同的形式来实现，并不限于本文所描述的实施例。相反地，提供这些实施例的目的是使对本发明的公开内容的理解更加透彻全面。

[0035] 除非另有定义，本文所使用的所有的技术和科学术语与属于本发明的技术领域的技术人员通常理解的含义相同。本文中在本发明的说明书中所使用的术语只是为了描述具体的实施例的目的，不是旨在于限制本发明。本文所使用的术语“及 / 或”包括一个或多个相关的所列项目的任意的和所有的组合。

[0036] 本发明的幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法基于分形理论发明创造的。下面先结合分形理论建立幂律流体在多孔介质中的有效粘度的分形模型，然后再阐述本发明的幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法。

[0037] 幂律流体在多孔介质中的有效粘度模型建立方式如下：

[0038] (1) 幂律流体的特性参数

[0039] 幂律流体的本构方程为：

$$[0040] \tau = \mu \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

[0041] 式中 μ 为幂律流体的粘度， $\dot{\gamma}$ 是剪切速率，n 是幂指数。

[0042] (2) 幂律流体在多孔介质中的平均流速

[0043] 幂律流体通过单根毛细管的流量方程为：

$$[0044] q(r) = \frac{n\pi r^{\frac{3+\frac{1}{n}}{n}} \Delta p^{\frac{1}{n}}}{(3n+1)(2\mu L_t)^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

[0045] 其中， Δp 是压降， L_t 是毛细管通道的实际长度，其分形幂规律为：

$$[0046] L_t = L_0^{D_T} (2r)^{1-D_T} \quad (3)$$

[0047] 其中， D_T 为毛细管的迂曲度分形维数， L_0 为毛细管的直线长度。

[0048] 考虑到毛细管的弯曲度，采用毛细管的实际长度后，(2) 式改写为

$$[0049] q(r) = \frac{n\pi r^{\frac{3+\frac{D_T}{n}}{n}} \Delta p^{\frac{1}{n}}}{(3n+1)2^{-\frac{D_T}{n}} \mu^n L_0^{\frac{D_T}{n}}} \quad (4)$$

[0050] 多孔介质中的孔隙半径大于或等于 r 的累积孔隙数目与孔隙大小分布服从如下的标度关系：

$$[0051] N = \left(\frac{r_{\max}}{r}\right)^{D_f} \quad (5)$$

[0052] 式中 r 和 r_{\max} 分别为孔隙半径和最大孔隙半径, D_f 为孔隙分形维数。从(5)式可以得到孔隙半径从 r_{\min} 到 r_{\max} 之间的孔隙总数为:

$$[0053] N_t = \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)^{D_f} \quad (6)$$

[0054] 将(6)式对 r 微分, 得到孔隙半径在 r 和 $r+dr$ 区间里的孔隙数目:

$$[0055] -dN = D_f r_{\max}^{D_f} r^{-(D_f+1)} dr \quad (7)$$

[0056] 其中, $-dN > 0$, 表明孔隙数目随着孔尺寸的增加而减小。

[0057] 式(7)除以(6)得到:

$$[0058] -\frac{dN}{N_t} = D_f r_{\min}^{D_f} r^{-(D_f+1)} dr = f(r)dr \quad (8)$$

[0059] 式中的 $f(r) = D_f r_{\min}^{D_f} r^{-(D_f+1)}$ 为孔隙分布的概率密度函数。

[0060] 幂律流体的平均流量(q)为:

$$[0061] q = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} q(r)f(r)dr = \frac{n\pi D_f r_{\max}^{\frac{3+D_T-D_f}{n}} r_{\min}^{D_f} \Delta p^{\frac{1}{n}}}{(3n+1)(3+\frac{D_T}{n}-D_f)2^{\frac{2-D_T}{n}} \mu^{\frac{1}{n}} L_0^{\frac{D_T}{n}}} \quad (9)$$

[0062] 横截面积为:

[0063]

$$A = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 L_t f(r) dr}{L_0 \phi} = \frac{\pi D_f L_0^{\frac{D_T-1}{n}} r_{\max}^{3-D_T-D_f} r_{\min}^{D_f}}{\phi 2^{D_T-1} (3-D_T-D_f)} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}] \quad (10)$$

[0064] 式(9)除以(10)得到通过多孔介质中幂律流体的平均流速(V)为:

$$[0065] V = \frac{n r_{\max}^{\frac{D_T+D_f}{n}} \phi 2^{D_T-1} \frac{2-D_T}{n} (3-D_T-D_f) \Delta p^{\frac{1}{n}}}{(3n+1)(3+\frac{D_T}{n}-D_f) \mu^{\frac{1}{n}} L_0^{\frac{D_T+D_f-1}{n}} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}]} \quad (11)$$

[0066] 式(11)中当 $n = 1$ 时简化为牛顿流体:

[0067]

$$V = \frac{r_{\max}^{2D_T} \phi 2^{2D_T-5} (3-D_T-D_f) \Delta p}{(3+D_T-D_f) \mu L_0^{2D_T-1} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}]} \quad (12)$$

[0068] (3) 幂律流体在多孔介质中的有效粘度

[0069] 牛顿流体满足的达西定律为:

$$[0070] V = \frac{K \Delta p}{\mu L_0} \quad (13)$$

[0071] 比较式(12)和(13)得到多孔介质的绝对渗透率 K :

$$[0072] K = \frac{r_{\max}^{2D_f} \phi 2^{2D_f-5} (3-D_T-D_f)}{(3+D_T-D_f) L_0^{2D_f-2} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}]} \quad (14)$$

[0073] 研究者 Balhoff 和 Thompson 利用简单的宏观模型来研究幂律流体在填充床中的平均流速与压降的关系如下：

$$[0074] V = \left(\frac{K}{\mu_{\text{eff}}} \frac{\Delta p}{L_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

$$[0075] K = \frac{4R^2 \phi^3}{72C(1-\phi)^2} \quad (16)$$

$$[0076] \mu_{\text{eff}} = \mu \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{K \phi}{\beta^2} \right)^{\frac{1-n}{2}} \quad (17)$$

[0077] 式中 β 和 C 为模型的经验常数, μ_{eff} 是幂律流体的有效粘度, R 为组成多孔介质的颗粒半径。

[0078] 联合式(1)、(14)和(15)得幂律流体在多孔介质的有效粘度分形表达式：

$$[0079] \mu_{\text{eff}} = \frac{\mu \left[\left(3 + \frac{D_f}{n} \right) \left(3 + \frac{D_f}{n} - D_f \right) \right]^n}{4(3+D_T-D_f)} \left\{ \frac{r_{\max}^{D_f} \phi (3-D_T-D_f) 2^{D_f-1}}{L_0^{D_f-1} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}]} \right\}^{1-n} \quad (18)$$

[0080] 式(11)和(18)可以看出, 多孔介质中幂律流体的平均流速和有效粘度不仅与幂律流体的特性参数(μ 、 n)有关, 而且与多孔介质的结构参数(ϕ 、 D_f 、 D_T 、 L_0 、 r_{\min} 、 r_{\max})有关。

[0081] (4) 多孔介质的结构参数

[0082] 多孔介质的宏观结构参数如下：

$$[0083] r_{\max} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\phi}{1-\phi}} \quad (19)$$

$$[0084] \frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{\sqrt{2(1-\phi)}}{24} \quad (20)$$

$$[0085] L_0 = R \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}(1-\phi)}} \quad (21)$$

[0086] 流体路径的弯曲度 Γ 和分形维数表示为：

$$[0087] \Gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + \sqrt{1-\phi} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{4}}{1 - \sqrt{1-\phi}}} \right] \quad (22)$$

$$[0088] D_T = 1 + \frac{\ln \Gamma}{\ln \frac{L_0}{2r_{av}}} \quad (23)$$

$$[0089] r_{av} = \frac{D_f r_{min}}{D_f - 1} [1 - (\frac{r_{min}}{r_{max}})^{D_f - 1}] \quad (24)$$

$$[0090] D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \frac{r_{min}}{r_{max}}} \quad (25)$$

[0091] 其中, r_{av} 表示平均孔隙半径, 分形模型(11)和(18)中; 对于实验给出的孔隙度 ϕ 和颗粒半径 R , 就可以根据方程(19)~(25)计算出多孔介质的结构参数。

[0092] 基于以上的幂律流体在多孔介质中的有效粘度分形模型, 本发明的幂律流体在多孔介质中的有效粘度预测方法, 包括如下步骤:

[0093] 步骤 a, 提供所述多孔介质的样本, 测量所述多孔介质的孔隙度 (ϕ) 和颗粒半径 (R);

[0094] 步骤 b, 根据所述多孔介质的孔隙度 (ϕ) 和颗粒半径 (R) 计算所述多孔介质在分形模型中的结构参数, 所述结构参数包括最小孔隙半径 (r_{min})、最大孔隙半径 (r_{max})、毛细管的直线长度 (L_0)、流体路径的弯曲度 (Γ)、毛细管的迂曲度分形维数 (D_T)、孔隙分形维数 (D_f), 其分别由如下公式计算得出:

$$[0095] r_{max} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\phi}{1-\phi}};$$

$$[0096] \frac{r_{min}}{r_{max}} = \frac{\sqrt{2(1-\phi)}}{24};$$

$$[0097] L_0 = R \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}(1-\phi)}};$$

$$[0098] \Gamma = \frac{1}{2} [1 + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + \sqrt{1-\phi} \frac{\sqrt{(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}} - 1)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1-\phi}}];$$

$$[0099] D_T = 1 + \frac{\ln \Gamma}{\ln \frac{L_0}{2r_{av}}};$$

$$[0100] r_{av} = \frac{D_f r_{min}}{D_f - 1} [1 - (\frac{r_{min}}{r_{max}})^{D_f - 1}];$$

$$[0101] D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \frac{r_{min}}{r_{max}}};$$

[0102] 步骤 c, 测量所述幂律流体的特性参数, 所述特性参数包括所述幂律流体的粘度

(μ) 及幂指数(n)；

[0103] 步骤 d, 根据所述多孔介质的结构参数及所述幂律流体的特性参数按照如下公式计算所述幂律流体的有效粘度(μ_{eff})：

$$[0104] \quad \mu_{\text{eff}} = \frac{\mu \left[\left(3 + \frac{1}{n} \right) \left(3 + \frac{D_T}{n} - D_f \right) \right]^n}{4(3 + D_T - D_f)} \cdot \left\{ \frac{r_{\max}^{D_T} \phi (3 - D_T - D_f) 2^{D_T-1}}{L_0^{D_T-1} [1 - (\frac{r_{\min}}{r_{\max}})^{3-D_T-D_f}]} \right\}^{1-n}$$

[0105] 图 1 表示上述幂律流体在多孔介质中的平均流速分形模型与研究者 Balhoff 和 Thompson 的网络模拟数据的比较。模拟中使用的幂律流体参数为 : $n = 0.3$, $\mu = 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, 使用的填充床参数为 : 粒子半径 $R = 0.05 \text{ cm}$, 孔隙度 $\phi = 0.38$, 绝对渗透率 $K = 8.135 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 。由图 1 可知, 流速随着压降梯度的增大而增大, 且幂律流体在多孔介质中的平均流速的分形模型与网络模拟数据符合得很好。

[0106] 图 2 表示上述幂律流体在多孔介质中的有效粘度的预测方法与研究者 Balhoff 和 Thompson 的宏观模型的比较, 可以看出有效粘度随着幂指数的增加而增加, 且二者吻合很好。

[0107] 上述预测方法根据多孔介质的结构参数及流体的特性参数, 可预测幂律流体在多孔介质中的有效粘度, 当幂律流体的特性参数变化时, 可随之预测对应的有效粘度。并且, 上述预测方法不含任何经验常数, 所有参数都有明确的物理意义, 因此预测的结果较为准确。因此, 上述预测方法可有效预测幂律流体在多孔介质中的有效粘度, 并且有助于地下石油开采。

[0108] 以上所述实施例仅表达了本发明的几种实施方式, 其描述较为具体和详细, 但并不能因此而理解为对本发明专利范围的限制。应当指出的是, 对于本领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明构思的前提下, 还可以做出若干变形和改进, 这些都属于本发明的保护范围。因此, 本发明专利的保护范围应以所附权利要求为准。

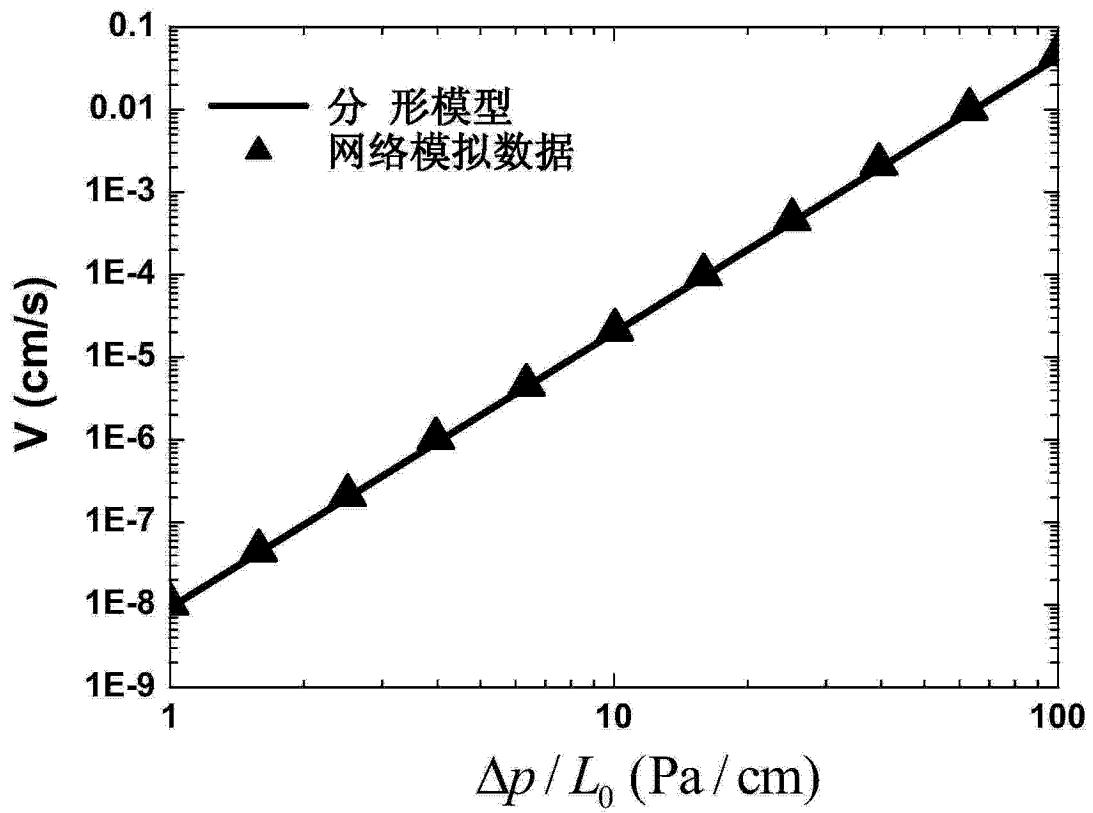


图 1

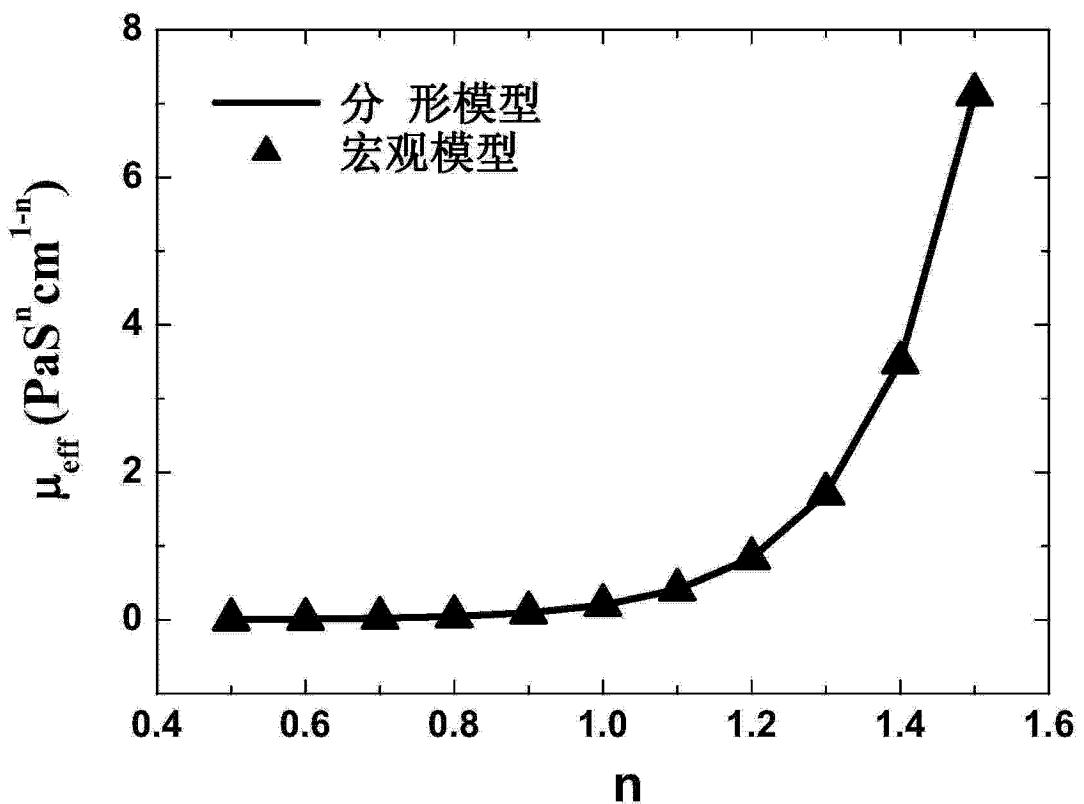


图 2