



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108829950 B

(45) 授权公告日 2021.04.27

(21) 申请号 201810546608.2

(22) 申请日 2018.05.31

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108829950 A

(43) 申请公布日 2018.11.16

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 李曹雄 林緬 江文滨 姬莉莉
曹高辉

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
代理人 胡剑辉

(51) Int. Cl.
G06F 30/20 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 105279790 A, 2016.01.27

CN 107449706 A, 2017.12.08

CN 104018829 A, 2014.09.03

US 8881587 B2, 2014.11.11

US 2016337444 A1, 2016.11.17

US 2010089124 A1, 2010.04.15

李曹雄.《孔隙网络对页岩储层自吸特征的影响与应用》.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技I辑》.2018,第B019-411页.

GaoHui Cao.《A 3D coupled model of organic matter and inorganic matrix for calculating the permeability of shale》.《ELSEVIER》.2017,第129-143页.

李玉丹 等.《基于分形理论的页岩基质表现渗透率研究》.《油气地质和采收率》.2017,第24卷(第1期),第92-99、105页.

审查员 王艳丽

权利要求书3页 说明书8页 附图1页

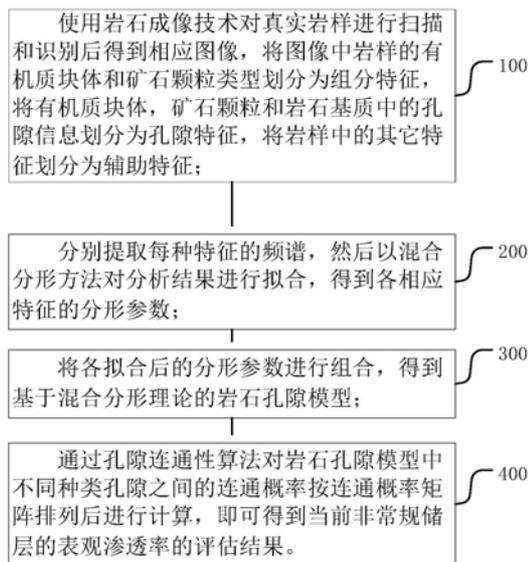
(54) 发明名称

一种基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法

(57) 摘要

本发明提供一种基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,包括如下步骤:使用岩石成像技术对真实岩样进行扫描和识别后得到相应图像,将图像中岩样划分为相应的特征;分别提取每种特征的频谱,然后以混合分形方法对分析结果进行拟合,得到各相应特征的分形参数;将各拟合后的分形参数进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型;通过孔隙连通性算法对岩石孔隙模型中不同种类孔隙之间的连通概率按连通概率矩阵排列后进行计算,即可得到当前非常规储层的表观渗透率的评估结果。本发明从真实岩样数据出发,结合孔隙连通性算法,得到了不同种类孔隙之间的连通概率矩阵,最终实现快速准确地评估非常规储层表观渗透率。

CN 108829950 B



1. 一种基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,使用岩石成像技术对真实岩样进行扫描和识别后得到相应图像,将图像中岩样的有机质块体和矿石颗粒类型划分为组分特征,将有机质块体,矿石颗粒和岩石基质中的孔隙信息划分为孔隙特征,将岩样中的其它特征划分为辅助特征;

步骤200,分别提取每种特征的频谱,然后以混合分形方法对分析结果进行拟合,得到各相应特征的分形参数;

步骤300,将各拟合后的分形参数进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型;

步骤400,针对岩石孔隙模型中不同种类的孔隙,使用孔隙连通概率算法建立连通概率矩阵,并基于连通概率矩阵计算渗透率,即可得到当前非常规储层的表观渗透率的评估结果;

计算渗透率的步骤如下:

$$k_{3D-IFM} = \sum_{i=1}^m \left(32 \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} + 2 \times 32 \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} + \dots + 2 \times 32 \frac{\lambda_{i-1}^2 N_{i-1}}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \right) \times C_i k_i(p_{avg}) + k_{matrix} \quad (1)$$

其中,迭代次数*i*,第*i*次迭代产生的孔隙/块体边长 λ_i ,第*i*次迭代中产生的孔隙/块体个数 N_i ,*A*为岩心表征单元面的截面积, C_i 为第*i*行块体/孔隙形状因子, $k_i(p_{avg})$ 为在平均压力 p_{avg} 下第*i*行块体/孔隙的渗透率, K_{matrix} 为基质渗透率项;

$k_i(p_{avg})$ 的计算公式需要根据矩阵中各行的类型进行判断;

①设,组分特征为*X*,其子组分特征分别以*X1*、*X2*……*Xn*的顺序依次编号,孔隙特征为*B*,其子孔隙特征以*B1*、*B2*……*Bn*的顺序依次编号,辅助特征为*Y*,其子辅助特征以*Y1*、*Y2*……*Yn*的顺序依次编号;组分特征*X*中,每一个组成子组分特征的块体都为多孔介质;当连通概率矩阵中第*i*行第四列记录组分特征*X*时, $k_i(p_{avg})$ 表达式为:

$$k_i(p_{avg}) = k_{sum-nD}(n, p_{avg}) = \sum_{j=1}^n k_{nD}(j, p_{avg}) \quad (2)$$

其中, $k_{nD}(j, p_{avg})$ 为平均压力 p_{avg} 下,第*j*级子孔隙特征的渗透率值;计算公式如下:

当*j*=1时

$$k_{nD}(1, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \left\{ \frac{\lambda_1 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_1^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_1} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

当*j*=2时

$$k_{nD}(2, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\} \\ + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

当*j*=3时

$$k_{nD}(3, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \right) \times$$

$$\left\{ \frac{\lambda_3 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_3^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_3} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

以此类推,当j=n时

$$k_{nD}(n, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + \dots + 2 \times 32C \frac{\lambda_{n-1}^2 N_{n-1}}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \right) \times$$

$$\left\{ \frac{\lambda_n \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_n^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_n} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ 为被聚并操作后的被包含在第i行所代表的多孔介质中的孔隙/块体的边长; N_1, N_2, \dots, N_i 为被聚并操作后的被包含在第i行所代表的多孔介质中的孔隙/块体的个数; 其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_i$;

②当连通概率矩阵中第i行第四列记录该行为未被聚并的孔时,渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$k_i(p_{avg}) = k_{inorg-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

③当连通概率矩阵中第i行第四列记录该行为子辅助特征Y1时,渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$k_i(p_{avg}) = k_{slit-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

④所述公式(1)中基质渗透率项 k_{matrix} 为

$$k_{matrix} = \varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2 + \dots + \varphi_n k_n$$

以上各式中, μ 为气体粘度, M 为气体摩尔数, R 为理想气体常数, T 为温度, ρ_{avg} 为平均密度, p_{avg} 为平均压力, α 为切向动量调节系数, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 为n种基质矿物百分比, k_1, k_2, \dots, k_n 为n种基质矿物的表观渗透率。

2. 根据权利要求1所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在于,所述步骤100中的所述孔隙特征是指有机质块体、矿石颗粒中的有机质孔隙和矿石中的粒间孔或粒内孔;所述辅助特征是指所述岩样中的天然裂缝或人工裂缝特征。

3. 根据权利要求1所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在于,所述的岩石成像技术包括SEM, FIB-SEM, Micro-CT, nano-CT。

4. 根据权利要求3所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在于,所述组分特征根据矿石颗粒的类型不同而细分为多个对应的子组分特征;所述孔隙特征对应所述子组分特征的不同而细分为多个对应的子孔隙特征;所述辅助特征根据与不同所述子组分特征的关系而细分为多个对应的子辅助特征。

5. 根据权利要求4所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在于,所述组分特征的频谱是建立在其中各子组分特征中各自的子组分的等效大小分布频谱上,所述孔隙特征的频谱是建立在各子孔隙特征的等效孔径的分布频谱上,所述辅助特

征的频谱是建立在子辅助特征所表示的裂缝密度、缝长和缝宽上。

6. 根据权利要求5所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在於,每个所述子组分特征的分形参数得到的每级子组分特征的等效大小和其对应个数共同构成的大小分布频谱,等同于该子组分特征的大小分布频谱;

每个所述子孔隙特征的分形参数得到的每级孔隙的等效直径和其对应个数共同构成的孔径大小分布频谱,等同于该子孔隙特征的孔径大小分布频谱;

每个所述子辅助特征的分形参数得到的每级子辅助特征的等效大小和其对应个数共同构成的裂缝频谱,等同于子辅助特征的裂缝频谱。

7. 根据权利要求6所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在於,使用孔隙连通概率算法建立连通概率矩阵的方式如下:将三种特征中的各子特征按照等效边长或等效直径的方式从大到小排序,其中,第一列为等效边长或等效直径大小,第二列为等效边长或等效直径所对应的个数,第三列连通概率,第四列为该行组分类型。

8. 根据权利要求7所述的基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,其特征在於,在排序前需要进行聚并操作。

一种基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法

技术领域

[0001] 本发明属于石油开采领域,特别是涉及一种基于岩心图像的能够快速准确地评估非常规储层表观渗透率的评价方法。

背景技术

[0002] 页岩气是从页岩储层中开采出的天然气,成分以甲烷为主,是一种重要的新兴能源。然而成功开发页岩气需要解决很多难题,其中的基础问题之一是快速而有效地评估页岩的表观渗透率。

[0003] 影响页岩气表观渗透率的因素有很多,主要有以下几点:第一,页岩非常致密,孔隙度和渗透率低,渗流空间小,主要孔隙直径在纳米量级;第二,渗流空间种类繁多,连通性较差,尺度不一,包括纳米级有机孔,微米级裂缝无机孔;第三,气体渗流和赋存机理复杂,包括游离态(以自由气形式存在于岩石孔隙与裂隙中),吸附态(吸附于岩石孔隙壁面)和溶解态(溶解于干酪根、沥青质和液态原油中)等。现有的各种技术方案对非常规储层样品的渗透率计算时计算量巨大,需要建立一种快速评估非常规储层样品渗透率的新方法。

[0004] 目前表征岩石孔隙空间的方法有毛管束法和孔隙空间重构法,其中毛管束法是表征岩石孔隙空间的经典方法之一。该方法将岩石孔隙简化为一系列平行的毛管束,以研究流体在高孔隙度岩石渗流过程中的渗流过程。该方法模型简单,计算简便。在此基础上发展了添加迂曲度、更改毛管束直径以及增加滑移项等一系列方程,以模拟不同种类岩石孔隙空间和流体流动过程。但毛管束法的缺点在于未考虑岩石中复杂的孔隙网络结构,也未考虑孔喉连通性,模型的建立基于毛管束理论模型,这类模型的孔隙网络组成与真实岩石有一定差距。

[0005] 而孔隙空间重构法则基于统计来表征岩石孔隙空间,该方法首先统计岩石中的孔隙分布频谱以及配位数。进一步建立一个网状联通管道组成的网络,管道模拟喉道,两个管道的交点模拟孔隙,将统计得到的孔径按比例分散进网络的交点上,然后按统计的配位数随机封堵管道,最终完成孔隙空间的重构。该方法的缺点在于将复杂的孔隙空间简化为标准的方形网状结构模型后,打散后随机分散进网络,取消了孔隙和喉道在空间上分布的独立性。此外,喉道的迂曲度、以及喉道本身的孔径分布也未加以考虑。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供及一种基于岩心图像的能够快速准确地评估非常规储层表观渗透率的评价方法。

[0007] 特别地,本发明提供一种基于岩心图像的非常规储层渗透率评价方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤100,使用岩石成像技术对真实岩样进行扫描和识别后得到相应图像,将图像中岩样的有机质块体和矿石颗粒类型划分为组分特征,将有机质块体,矿石颗粒和岩石基质中的孔隙信息划分为孔隙特征,将岩样中的其它特征划分为辅助特征;

[0009] 步骤200,分别提取每种特征的频谱,然后以混合分形方法对分析结果进行拟合,得到各相应特征的分形参数;

[0010] 步骤300,将各拟合后的分形参数进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型;

[0011] 步骤400,通过孔隙连通性算法对岩石孔隙模型中不同种类孔隙之间的连通概率按连通概率矩阵排列后进行计算,即可得到当前非常规储层的表观渗透率的评估结果。

[0012] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤100中的所述孔隙特征是指有机质块体、矿石颗粒中的有机质孔隙和矿石中的粒间孔或粒内孔;所述辅助特征是指所述岩样中的天然裂缝或人工裂缝特征。

[0013] 在本发明的一个实施方式中,所述的岩石成像技术包括SEM,FIB-SEM,Micro-CT,nano-CT。

[0014] 在本发明的一个实施方式中,所述组分特征根据矿石颗粒的类型不同而细分为多个对应的子组分特征;所述孔隙特征对应所述子组分特征的不同而细分为多个对应的子孔隙特征;所述辅助特征根据与不同所述子组分特征的关系而细分为多个对应的子辅助特征。

[0015] 在本发明的一个实施方式中,所述组分特征的频谱是建立在其中各子组分特征中各自的子组分的等效大小分布频谱上,所述孔隙特征的频谱是建立在各子孔隙特征的等效孔径的分布频谱上,所述辅助特征的频谱是建立在子辅助特征所表示的裂缝密度、缝长和缝宽上。

[0016] 在本发明的一个实施方式中,每个所述子组分特征的分形参数得到的每级子组分特征的等效大小和其对应个数共同构成的大小分布频谱,等同于该子组分特征的大小分布频谱;每个所述子孔隙特征的分形参数得到的每级孔隙的等效直径和其对应个数共同构成的孔径大小分布频谱,等同于该子孔隙特征的孔径大小分布频谱;每个所述子辅助特征的分形参数得到的每级子辅助特征的等效大小和其对应个数共同构成的裂缝频谱,与等同于子辅助特征的裂缝频谱。

[0017] 在本发明的一个实施方式中,使用连通孔隙概率算法建立连通概率矩阵的方式如下:将三种特征中的各子特征按照等效边长或等效直径的方式从大到小排序,其中,第一列为等效边长或等效直径大小,第二列为等效边长或等效直径所对应的个数,第三列连通概率,第四列为该行组分类型。

[0018] 在本发明的一个实施方式中,在排序前需要进行聚并操作。

[0019] 在本发明的一个实施方式中,计算渗透率的步骤如下:

$$k_{3D-IFM} = \sum_{i=1}^m \left(32 \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} + 2 \times 32 \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} + \dots + 2 \times 32 \frac{\lambda_{i-1}^2 N_{i-1}}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \right) \times C_i k_i(p_{avg}) + k_{matrix}$$

[0020] (1)

[0021] 其中,迭代次数*i*,分形标度*F*,第*i*次迭代产生的孔隙/块体边长 λ_i ,最大孔隙/块体边长 λ_{max} ,第*i*次迭代中产生的孔隙/块体个数 N_i ,第*i*次迭代中不参与迭代的孔隙/块体个数 $N_{i-soild}$,*A*为岩心表征单元面的截面积, C_i 为第*i*行块体/孔隙形状因子, $k_i(p_{avg})$ 为在平均压力 p_{avg} 下第*i*行块体/孔隙的渗透率。

[0022] 在本发明的一个实施方式中, $k_i(p_{avg})$ 的计算公式需要根据矩阵中各行的类型进

行判断;

[0023] ①设,组分特征为X,其子组分特征分别以X1、X2……Xn的顺序依次编号,孔隙特征为B,其子孔隙特征以B1、B2……Bn的顺序依次编号,辅助特征为Y,其子辅助特征以Y1、Y2……Yn的顺序依次编号;组分特征X中,每一个组成子组分特征的块体都为多孔介质;当连通概率矩阵中第i行第四列记录组分特征X时, $k_i(p_{avg})$ 表达式为:

$$[0024] \quad k_i(p_{avg}) = k_{sum-nD}(n, p_{avg}) = \sum_{j=1}^n k_{nD}(j, p_{avg}) \quad (2)$$

[0025] 其中, $k_{nD}(j, p_{avg})$ 为平均压力 p_{avg} 下,第j级子孔隙特征的渗透率值;计算公式如下:

[0026] 当j=1时

$$[0027] \quad k_{nD}(1, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \left\{ \frac{\lambda_1 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_1^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_1} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0028] 当j=2时

$$[0029] \quad k_{nD}(2, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\} \\ + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0030] 当j=3时

$$[0031] \quad k_{nD}(3, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \right) \times \\ \left\{ \frac{\lambda_3 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_3^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_3} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0032] 以此类推,当j=n时

$$[0033] \quad k_{nD}(n, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + \dots + 2 \times 32C \frac{\lambda_{n-1}^2 N_{n-1}}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \right) \times \\ \left\{ \frac{\lambda_n \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_n^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_n} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0034] 其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n$ 为被聚并操作后的被包含在第i行所代表的多孔介质中的孔隙的等效直径; $N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_n$ 为被聚并操作后的被包含在第i行所代表的多孔介质中的孔隙的个数;其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j \geq \dots \geq \lambda_n$;

[0035] ②当连通概率矩阵中第i行第四列记录该行为未被聚并的孔时,渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$[0036] \quad k_i(p_{avg}) = k_{inorg-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0037] ③当连通概率矩阵中第i行第四列记录该行为子辅助特征Y1时,渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$[0038] \quad k_i(p_{avg}) = k_{slit-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0039] ④所述公式(1)中基质渗透率项 k_{matrix} 为

$$[0040] \quad k_{matrix} = \varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2 + \dots + \varphi_n k_n$$

[0041] 以上各式中, μ 为气体粘度, M 为气体摩尔数, R 为理想气体常数, T 为温度, ρ_{avg} 为平均密度, p_{avg} 为平均压力, α 为切向动量调节系数, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 为 n 种基质矿物百分比, k_1, k_2, \dots, k_n 为 n 种基质矿物的表观渗透率。

[0042] 本发明从真实岩样数据出发,提取主要组成成分,然后以混合分形理论为基础,针对每一种组分,分别使用分形参数拟合,最后将各组分进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型。进一步结合孔隙连通性算法,得到了不同种类孔隙之间的连通概率矩阵,最终构建一种非常规储层渗透率评价方法,实现快速准确地评估非常规储层表观渗透率。

附图说明

[0043] 图1是本发明一个实施方式评价方法流程图。

具体实施方式

[0044] 如图1所示,本发明一个实施方式公开的非常规储层渗透率评价方法一般性包括如下步骤:

[0045] 步骤100,使用岩石成像技术对真实岩样进行扫描和识别后得到相应图像,将图像中岩样的有机质块体和矿石颗粒类型划分为组分特征,将有机质块体,矿石颗粒和岩石基质中的孔隙信息划分为孔隙特征,将岩样中的其它特征划分为辅助特征;

[0046] 这里的岩石成像技术包括但不限于SEM(扫描电子显微镜),FIB-SEM(聚焦离子束),Micro-CT(微计算机断层扫描技术),nano-CT等技术。

[0047] 在上述各成像技术中,即可以只采用一种方式成像后进行分析,也可以同时采用两种以上的成像技术进行结合分析,因为有的成像技术观测范围广,有的成像技术精度高,可以综合起来得到块体大小分布和孔隙分布。

[0048] 岩石可以是页岩、致密砂岩或者其它非常规储层岩样。

[0049] 在划分时,将岩样图像中的有机质块体、黄铁矿块体、石英,长石,蒙脱石等一类矿石类型统一划分为组分特征,并可对该组分特征中的每个具体矿石按子组分特征X1、子组分特征X2、子组分特征X3……的编号进行细分类;将图像中的粒间孔、粒内孔等孔隙全部划分为孔隙特征中,其中根据孔隙的分布位置如有机质块体中的有机孔,黄铁矿块体中的孔,基质中的无机孔等,按子孔隙特征B1、子孔隙特征B2、子孔隙特征B3……进行细分类;辅助特征是除前述两种特征外的其它特征,如裂纹特征、密度特征,本实施方式是以裂缝作为辅助特征,裂缝根据类型可分为自然裂缝和人工裂缝,其根据裂缝密度、缝长、缝宽等信息将辅助特征分为子辅助特征Y1、子辅助特征Y2、子辅助特征Y3、……。

[0050] 步骤200,分别提取每种特征的频谱,然后以混合分形方法对分析结果进行拟合,得到各相应特征的分形参数;

[0051] 具体包括:基于采用的不同尺度岩心数字成像技术的扫描结果,提取图像中组分

特征、孔隙特征和裂缝特征的频谱,其中组分特征是该类型中有机质体块体、黄铁矿块体等尺寸大小分布频谱(以有机质为例,为有机质块体等效大小频谱),孔隙特征为孔隙分布频谱(以有机质块中的有机孔为例,为有机质块体中的有机孔等效孔径频谱),辅助特征为裂缝的裂缝密度,缝长缝宽频谱。

[0052] 使用混合分形方法对组分特征的块体大小分布频谱进行拟合,得到分形参数AF1,通过分形参数AF1得到的每个子组分特征的等效大小和其对应个数共同构成的块体大小分布频谱,该块体大小分布频谱形状等同于相应子组分特征的块体大小分布频谱,即两者相同或接近。

[0053] 再使用混合分形方法对孔隙特征的孔隙直径大小分布频谱进行拟合,得到分形参数BF1,使分形参数BF1得到的每级子孔隙特征的等效直径和其对应个数共同构成的孔径大小分布频谱,等同于相应子孔隙特征的孔径大小分布频谱,即两者相同或接近。

[0054] 再使用混合分形方法对裂缝特征的裂缝密度、缝长缝宽频谱进行拟合,得到分形参数CF1,使分形参数CF1得到的每级子辅助特征的等效大小和其对应个数共同构成的裂缝频谱等同于该子裂缝特征的裂缝频谱,即两者相同或接近。

[0055] 步骤300,将各拟合后的分形参数进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型;

[0056] 在本步骤中,组分特征一定包括孔隙特征,但孔隙特征不一定被组分特征包括,例如有机质块体A1本身的块体大小有分布,每个有机质块体A1内部又含有有机孔B1,每块有机质块体A1内的有机孔B1都符合上述B1类有机孔所代表的孔隙分布频谱。

[0057] 步骤400,通过孔隙连通性算法对岩石孔隙模型中不同种类孔隙之间的连通概率按矩阵排列后进行计算,即可得到当前非常规储层的表观渗透率的评估结果。

[0058] 使用连通孔隙概率算法建立矩阵的方式如下:将三种特征中的各子特征按照等效边长或等效直径的方式从大到小排序,其中,第一列为等效边长或等效直径大小,第二列为等效边长或等效直径所对应的个数,第三列为连通概率,第四列为该行类型;其中等效边长或等效直径大小: $\lambda_{A1,1} > \lambda_{B2,1} > \lambda_{A1,2}$ 。 λ 代表等效边长或等效直径。 $\lambda_{A1,1}$ 代表块体A中种类A1的块体中按从大到小排序后第1大样品的等效边长; $\lambda_{B2,1}$ 代表孔隙B中种类B2(B2不被A中任意块体包含,即未参与聚并操作的孔,比如无机孔)的孔隙中按从大到小排序后第1大孔隙的等效直径; $\lambda_{A1,2}$ 表块体A中种类A1的块体中按从大到小排序后第2大样品的等效边长。

[0059] 本发明从真实岩样数据出发,提取主要组成成分,然后以混合分形理论为基础,针对每一种组分分别使用分形参数拟合,最后将各组分进行组合,得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型。进一步结合孔隙连通性算法,得到了不同种类孔隙之间的连通概率矩阵,最终构建一种非常规储层渗透率评价方法,实现快速准确地评估非常规储层表观渗透率。

[0060] 2孔隙等效直径满足第一列从大到小。直径相等时使用毛管力比大小,非润湿相驱替润湿相时毛管力从大到小排,润湿相驱替非润湿相时毛管力从小到大排。

[0061] 在步骤400中,在排序前需要进行聚并操作。

[0062] 具体地的聚并操作过程如下:设图像中包含有机质块体A1,该有机质块体A1中的孔为有机孔B1,那么每一个有机质块体A1被当做多孔介质,每一个有机质块体A1中的有机孔B1都符合其分形分布,那么在该步骤中只取有机质块体A1参与排序,不将有机质块体中的有机孔B1参与排序;如果中的某一类,例如无机孔B2不隶属于组分特征中任何一类,那

么,无机孔B2参与排序。

[0063] 在本发明的一个实施方式中,计算渗透率的步骤如下:

$$[0064] \quad k_{3D-IFM} = \sum_{i=1}^m \left(32 \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} + 2 \times 32 \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} + \dots + 2 \times 32 \frac{\lambda_{i-1}^2 N_{i-1}}{A} \frac{\lambda_i^2 N_i}{A} \right) \times C_i k_i(p_{avg}) + k_{matrix} \quad (1)$$

[0065] 其中,迭代次数*i*,分形标度*F*,第*i*次迭代产生的孔隙或块体边长 λ_i ,最大孔隙或块体边长 λ_{max} ,第*i*次迭代中产生的孔隙或块体个数 N_i ,第*i*次迭代中不参与迭代的孔隙或块体个数 $N_{i-soild}$,*A*为岩心表征单元面的截面积, C_i 为第*i*行块体或孔隙形状因子, $k_i(p_{avg})$ 为在平均压力 p_{avg} 下第*i*行块体或孔隙的渗透率。

[0066] $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_m$ 为矩阵中的第一列第一行的块体或孔隙等效直径大小, $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_m$ 为矩阵中的第二列块体或孔隙数目,例如第一行 λ_1 对应的块体或孔隙数目 N_1 ,第*i*行 λ_i 对应的块体或孔隙数目 N_i 。

[0067] $k_i(p_{avg})$ 的计算公式需要根据矩阵中各行的类型进行判断;

[0068] ①设,组分特征为*X*,其子组分特征分别以*X1*、*X2*……*Xn*的顺序依次编号,孔隙特征为*B*,其子孔隙特征以*B1*、*B2*……*Bn*的顺序依次编号,辅助特征为*Y*,其子辅助特征以*Y1*、*Y2*……*Yn*的顺序依次编号;组分特征*X*中,每一个组成子组分特征的块体都为多孔介质;当连通概率矩阵中第*i*行第四列记录组分特征*X*时, $k_i(p_{avg})$ 表达式为:

$$[0069] \quad k_i(p_{avg}) = k_{sum-nD}(n, p_{avg}) = \sum_{j=1}^n k_{nD}(j, p_{avg}) \quad (2)$$

[0070] 其中, $k_{nD}(j, p_{avg})$ 为平均压力 p_{avg} 下,第*j*级子孔隙特征的渗透率值;计算公式如下:

[0071] 当*j*=1时

$$[0072] \quad k_{nD}(1, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \left\{ \frac{\lambda_1 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_1^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_1} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0073] 当*j*=2时

$$[0074] \quad k_{nD}(2, p_{avg}) = 32C \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\} \\ + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \left\{ \frac{\lambda_2 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_2^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_2} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0075] 当*j*=3时

$$[0076] \quad k_{nD}(3, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_2^2 N_2}{A} \frac{\lambda_3^2 N_3}{A} \right) \times \\ \left\{ \frac{\lambda_3 \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_3^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_3} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0077] 以此类推,当*j*=*n*时

$$k_{nD}(n, p_{avg}) = \left(32C \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + 2 \times 32C \frac{\lambda_1^2 N_1}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} + \dots + 2 \times 32C \frac{\lambda_{n-1}^2 N_{n-1}}{A} \frac{\lambda_n^2 N_n}{A} \right) \times$$

$$\left\{ \frac{\lambda_n \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_n^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_n} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0079] 其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n$ 为被聚并操作后的被包含在第 i 行所代表的多孔介质中的孔隙的等效直径; $N_1, N_2, \dots, N_j, \dots, N_n$ 为被聚并操作后的被包含在第 i 行所代表的多孔介质中的孔隙的个数; 其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j \geq \dots \geq \lambda_n$;

[0080] ②当连通概率矩阵中第 i 行第四列记录该行为前述聚并的孔时, 渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$k_i(p_{avg}) = k_{inorg-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0082] ③当连通概率矩阵中第 i 行第四列记录该行为子辅助特征 $Y1$ 时, 渗透率项 $k_i(p_{avg})$ 为

$$k_i(p_{avg}) = k_{slit-nD}(n) = \left\{ \frac{\lambda_i \mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + \frac{\lambda_i^2}{32} \left[1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{2\mu}{p_{avg} \lambda_i} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right] \right\}$$

[0084] ④公式 (1) 中基质渗透率项 k_{matrix} 为

$$k_{matrix} = \varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2 + \dots + \varphi_n k_n$$

[0086] 以上各式中, μ 为气体粘度, M 为气体摩尔数, R 为理想气体常数, T 为温度, ρ_{avg} 为平均密度, p_{avg} 为平均压力, α 为切向动量调节系数, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 为 n 种基质矿物百分比, k_1, k_2, \dots, k_n 为 n 种基质矿物的气测渗透率。

[0087] 实施例一:

[0088] 1、取四川盆地石柱区块下志留统龙马溪组页岩样品, 以 SEM 作为岩石成像技术为例, 对样品进行扫描。

[0089] 2、分析扫描结果, 取混合分形模型截面为正方形, 边长为 $380\mu\text{m}$ 。黄铁矿基本表征单元为单个黄铁矿, 有机质基本单元面为边长 $2.08\mu\text{m}$ 的正方形。

[0090] 3、将各拟合后的分形参数进行组合, 得到基于混合分形理论的岩石孔隙模型, 通过孔隙连通性算法对岩石孔隙模型中不同种类孔隙之间的连通概率按矩阵排列后进行计算, 即可得到当前非常规储层的表观渗透率的评估结果。

[0091] 其中, 有机质占混合分形模型面积的 3% , 黄铁矿在混合分形模型平面中有 82 个, 黄铁矿平均直径 182nm , 微裂缝宽度在 $20\text{nm}-85\text{nm}$ 之间, 平均宽度 40nm , 平均长度 $5.18\mu\text{m}$, 平均裂缝密度为 50.3 条/ $10000\mu\text{m}^2$ 。

[0092] 4、本方法计算得到该岩样渗透率为 99.17nD , 实验测得渗透率为 91.36nD , 误差 8.55% , 渗透率计算结果与真实岩心渗透率计算结果相近, 本方法可靠。

[0093] 至此, 本领域技术人员应认识到, 虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例, 但是, 在不脱离本发明精神和范围的情况下, 仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此, 本发明的范围应被理解和认

定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

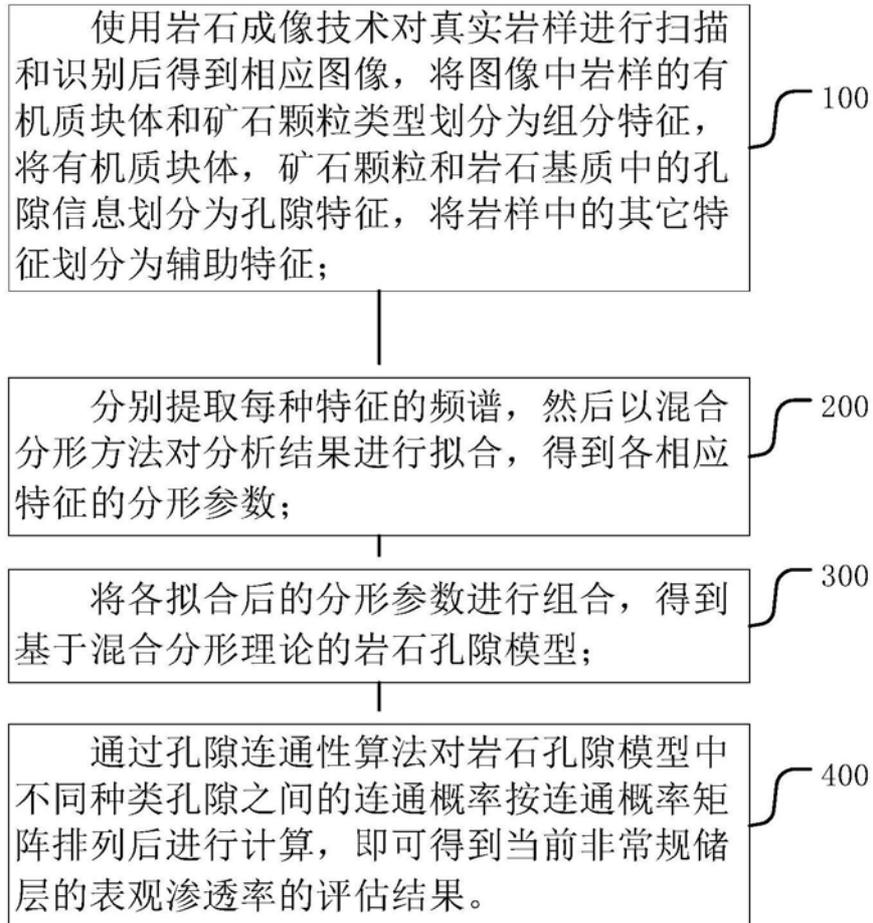


图1