(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110579433 B
(45)授权公告日 2022.02.01

(21)申请号 201910942485.9
(22)申请日 2019.09.30
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110579433 A
(43)申请公布日 2019.12.17
(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 江文滨 林缅 周羁 曹高辉 姬莉莉
(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 席卷
(51)Int.Cl.
G01N 15/08(2006.01)

(56)对比文件
CN 108801879 A,2018.11.13
CN 110261282 A,2019.09.20
CN 106525644 A,2017.03.22
CN 109612900 A,2019.04.12
CN 104713814 A,2015.06.17
CN 103575631 A,2014.02.12
CN 106153854 A,2016.11.23
CN 103983533 A,2014.08.13
US 2008303520 A1,2008.12.11
CN 107655805 A,2018.02.02
EP 1212696 A1,2002.06.12
CN 103226089 A,2013.07.31
CN 109655391 A,2019.04.19
US 2017082326 A1,2017.03.23
CN 108956415 A,2018.12.07
CN 105910971 A,2016.08.31
Hochang Jang 等."Experimental apparatus and method to investigate permeability and porosity of shale matrix from Haenam Basin in Korea".《Environmental Earth Sciences》.2015,第74卷第3333-3343页. (续)

审查员 赵鹏

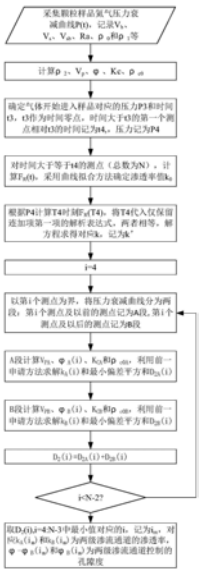
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种颗粒样品两级渗透率的获取方法

(57)摘要

本发明实施例涉及一种颗粒样品两级渗透率的获取方法,针对现有的颗粒样品渗透率测试中发现的部分样品的压力衰减曲线具有快速和慢速两个明显不同阶段的特点,假定页岩内部具有两级渗流通道和空间,可分别提取两级空间的孔隙度和渗透率,所提取的孔、渗参数正演计算的结果较现有方法与实测值更为吻合,有助于深入认识页岩气储集空间孔、渗特征,为储层评价提供更全面和准确的参数。



[转续页]

[接上页]

(56)对比文件

杨泽皓 等.“测量页岩径向渗透率和孔隙度的新方法”.《石油学报》.2015,第36卷(第4期),第482-489页.

Caoxiong Li 等.“Rapid Evaluation of the Permeability of Organic-Rich Shale Using the 3D Intermingled-Fractal Model”.《SPE Journal》.2018,第23卷(第6期),第2175-2187页.

1.一种颗粒样品两级渗透率的获取方法，其特征在于，所述方法包括：

获取压力随时间变化的曲线P(t)、基准腔体积V_b、放入样品前样品腔体积V_s、样品总体体积V_{sb}、颗粒平均半径R_a、测试温度T、测试阀开启前基准腔的气体密度ρ_1和样品腔的气体密度ρ_0；

基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2、样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0}；

确定气体开始进入样品对应的压力P_3，从所述压力随时间变化的曲线P(t)中确定压力P_3对应的时刻t_3；

选择所有大于所述时刻t_3的测点，基于氦气状态方程计算气体密度ρ(t)和质量分数F_R(t)，对ln(F_R(t))中所有大于所述时刻t_3的测点和时间t进行线性拟合，得到斜率s_1，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0；

确定渗透率k′，设定i的初始值为4，以第i个测点为界，将压力衰减曲线分为两段：第i个测点及以前的测点记为A段，压力衰减曲线为P_A(t)；第i个测点及以后的测点记为B段，压力衰减曲线为P_B(t)；

基于氦气状态方程、第i个测点的压力P_i和温度T，计算对应的气体密度ρ_i，计算A段的孔隙体积V_{pA}、孔隙度Φ_A(i)、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cA}和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0A}，输入(k_A(i)，D_{2A}(i))＝f(P_A(t)，K_{cA}，ρ_{c0A}，ρ_0，R_a，Φ_A(i)，k_0，k′)求得对应的渗透率最优解k_A(i)和A段最小偏差平方和D_{2A}(i)；

计算B段的孔隙体积V_{pB}、孔隙度Φ_B(i)、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cB}和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0B}，输入(k_B(i)，D_{2B}(i))＝f(P_B(t)，K_{cB}，ρ_{c0B}，ρ_0，R_a，Φ_B(i)，k_0，k′)求得对应的渗透率最优解k_B(i)和B段最小偏差平方和D_{2B}(i)；

确定k_A(i)和k_B(i)为两级渗流通道的渗透率值。

2.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2、样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0}：

$$V_p=\frac{\rho_1 V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)-\rho_2\left(V_b+V_s-V_{sb}\right)}{\left(\rho_2-\rho_0\right)}$$

$$\phi=\frac{V_p}{V_{sb}}$$

$$K_c=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_p}$$

$$\rho_{c0}=\frac{\rho_1 V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}+V_p\right)}{V_b+V_s-V_{sb}+V_p}$$

。

3.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述确定气体开始进入样品对应的压力P_3，包括：

利用公式确定 $\rho_3=\dfrac{\rho_1 V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)}{V_b+V_s-V_{sb}}$；

基于氦气状态方程，由ρ_3和温度T计算P_3。

4.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，确定质量分数$F_R(t)$，包括：

$$F_R(t)=1-\frac{\left(K_c+1\right)\left(\rho_{c0}-\rho(t)\right)}{\rho_{c0}-\rho_0}$$ 。

5.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0：

$$k_0=-\frac{R_a^2\phi\mu c_g s_1}{\alpha_1^2}$$ ；

其中R_a为颗粒样品的半径；μ为气体的粘性系数，c_g为气体压缩系数；α_1为超越方程 $\tan\alpha=\dfrac{3\alpha}{3+K_c\alpha^2}$的1次根。

6.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，确定渗透率k′，包括：

$$F_R\left(t_4\right)=6K_c\left(K_c+1\right)e^{-\frac{k'\alpha_n^2 t_4}{\mu c_g\phi R_a^2}}\frac{1}{K_c^2\alpha_1^2+9\left(K_c+1\right)},$$

其中，α_1则代表的是超越方程$\tan\alpha=\dfrac{3\alpha}{3+K_c\alpha^2}$的1次根，$t_4$表示时刻，μ为气体的粘性系数，$c_g$为气体压缩系数。

7.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，计算对应的气体密度ρ_i，计算A段的孔隙体积V_{pA}、孔隙度Φ_A、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cA}和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0A}：

$$V_{pA}=\frac{\rho_1 V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)-\rho_i\left(V_b+V_s-V_{sb}\right)}{\left(\rho_i-\rho_0\right)}$$

$$\phi_A(i)=\frac{V_{pA}}{V_{sb}}$$ 。

$$K_{cA}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_{pA}}$$

$$\rho_{c0A}=\rho_{c0}$$

8.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，利用下述公式，计算B段的孔隙体积V_{pB}、孔隙度$\Phi_B(i)$、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cB}和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0B}：

$$\phi_B(i)=\phi-\phi_A$$

$$V_{pB}=V_{sb}\cdot\phi_B(i)$$

$$K_{cB}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}+V_{pA}}{V_{pB}}。$$

$$\rho_{c0B}=\rho_i$$

9.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述确定$k_A(i)$和$k_B(i)$为两级渗流通道的渗透率值，包括：

计算总的最小偏差平方和$D_2(i)=D_{2A}(i)+D_{2B}(i)$；

选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值。

10.根据权利要求9所述的方法，其特征在于，所述选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值，包括：

如果$i>N-3$，选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值。

一种颗粒样品两级渗透率的获取方法

技术领域

[0001] 本发明实施例涉及石油工程技术领域，尤其涉及一种颗粒样品两级渗透率的获取方法。

背景技术

[0002] 目前国内页岩气可开采资源量丰富，是最具战略性的接替能源之一。页岩储层评价是页岩气勘探和开发的重要环节，渗透率是页岩储层评价的重要指标之一。

[0003] 由扫描电子显微镜图像可以看出，页岩内部分布着有机质孔、颗粒间(溶)孔、自生矿物晶间孔和层理缝、节理缝、溶蚀缝等，其尺度跨越六到七个数量级，不同尺度的孔隙(缝)的渗流能力差异明显。为了便于分析，一般将页岩内的空隙空间划分为基质以及裂缝两级，基质渗透率较低，而裂缝渗透率较高。

[0004] 相关技术中，采用柱塞样进行渗透率测试时，由于柱塞样中存在裂缝，所得的渗透率值主要由裂缝特征控制，基质的贡献被湮没，无法获得基质渗透率。现有的颗粒样品渗透率测试中发现的部分样品的压力衰减曲线具有快速和慢速两个明显不同阶段的特点，现有方法所基于的扩散模型假定整个颗粒内部具有均一的渗透率和孔隙度，无法将两级通道的渗透率分别提取出来。

发明内容

[0005] 鉴于此，为解决现有技术中的问题，本发明实施例提供了一种颗粒样品两级渗透率的获取方法。

[0006] 第一方面，本发明实施例提供了一种颗粒样品两级渗透率的获取方法，所述方法包括：

[0007] 获取压力随时间变化的曲线P(t)、基准腔体积V_b、放入样品前样品腔体积V_s、样品总体体积V_{sb}、颗粒平均半径R_a、测试温度T、测试阀开启前基准腔的气体密度ρ_1和样品腔的气体密度ρ_0；

[0008] 基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2、样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0}；

[0009] 确定气体开始进入样品对应的压力P_3，从所述压力随时间变化的曲线P(t)中确定压力P_3对应的时刻t_3；

[0010] 选择所有大于所述时刻t_3的测点，基于氦气状态方程计算气体密度ρ(t)和质量分数$F_R(t)$，对$\ln(F_R(t))$中所有大于所述时刻t_3的测点和时间t进行线性拟合，得到斜率s_1，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0；

[0011] 确定渗透率k′，设定i的初始值为4，以第i个测点为界，将压力衰减曲线分为两段：第i个测点及以前的测点记为A段，压力衰减曲线为$P_A(t)$；第i个测点及以后的测点记为B段，压力衰减曲线为$P_B(t)$；

[0012] 基于氦气状态方程、第i个测点的压力P_i和温度T，计算对应的气体密度ρ_i，计算A段的孔隙体积V_{pA}、孔隙度Φ_A、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cA}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0A}，输入$(k_A(i),D_{2A}(i))=f(P_A(t),K_{cA},\rho_{c0A},\rho_0,R_a,\Phi_A,k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_A(i)$；

[0013] 计算B段的孔隙体积V_{pB}、孔隙度$\Phi_B(i)$、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cB}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0B}，输入$(k_B(i),D_{2B}(i))=f(P_B(t),K_{cB},\rho_{c0B},\rho_0,R_a,\Phi_B(i),k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_B(i)$；

[0014] 确定$k_A(i)$和$k_B(i)$为两级渗流通道的渗透率值。

[0015] 在一个可能的实施方式中，利用下述公式，基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2、样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0}：

[0016]
$$V_p=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)-\rho_2\left(V_b+V_s-V_{sb}\right)}{\left(\rho_2-\rho_0\right)}$$
$$\phi=\frac{V_p}{V_{sb}}$$
$$K_c=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_p}$$
$$\rho_{c0}=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}+V_p\right)}{V_b+V_s-V_{sb}+V_p}$$
。

[0017] 在一个可能的实施方式中，所述确定气体开始进入样品对应的压力P_3，包括：

[0018] 利用公式确定$\rho_3=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)}{V_b+V_s-V_{sb}}$；

[0019] 基于氦气状态方程，由ρ_3和温度T计算P_3。

[0020] 在一个可能的实施方式中，所述质量分数$F_R(t)$，包括：

[0021] $$F_R\left(t\right)=1-\frac{\left(K_c+1\right)\left(\rho_{c0}-\rho\left(t\right)\right)}{\rho_{c0}-\rho_0}$$ 。

[0022] 在一个可能的实施方式中，利用下述公式，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0：

[0023] $$k_0=-\frac{R_a^2\phi\mu c_g s_1}{\alpha_1^2}$$ ；

[0024] 其中R_a为颗粒样品的半径；μ为气体的粘性系数，c_g为气体压缩系数；α_1为超越方程$\tan\alpha=\frac{3\alpha}{3+K_c\alpha^2}$的1次根。

[0025] 在一个可能的实施方式中，利用下述公式，确定渗透率k′，包括：

[0026] $$F_R(t_4)=6K_c(K_c+1)e^{-\frac{k'\alpha_n^2 t_4}{\mu c_g \phi R_a^2}}\frac{1}{K_c^2\alpha_1^2+9(K_c+1)}$$。

[0027] 在一个可能的实施方式中，利用下述公式，计算对应的气体密度ρ_i，计算A段的孔隙体积V_{pA}、孔隙度Φ_A、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cA}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0A}：

[0028] $$V_{pA}=\frac{\rho_1 V_b+\rho_0(V_s-V_{sb})-\rho_i(V_b+V_s-V_{sb})}{(\rho_i-\rho_0)}$$
$$\phi_A=\frac{V_{pA}}{V_{sb}}$$
$$K_{cA}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_{pA}}$$
$$\rho_{c0A}=\rho_{c0}$$
。

[0029] 在一个可能的实施方式中，利用下述公式，计算B段的孔隙体积V_{pB}、孔隙度$\Phi_B(i)$、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cB}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0B}：

[0030] $$\phi_B(i)=\phi-\phi_A$$
$$V_{pB}=V_{sb}\cdot\phi_B(i)$$
$$K_{cB}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}+V_{pA}}{V_{pB}}$$
$$\rho_{c0B}=\rho_i$$
。

[0031] 在一个可能的实施方式中，所述确定$k_A(i)$和$k_B(i)$为两级渗流通道的渗透率值，包括：

[0032] 计算总的最小偏差平方和$D_2(i)=D_{2A}(i)+D_{2B}(i)$；

[0033] 选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值。

[0034] 在一个可能的实施方式中，所述选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值，包括：

[0035] 如果$i>N-3$，选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值。

[0036] 本发明实施例提供的技术方案，针对现有的颗粒样品渗透率测试中发现的部分样品的压力衰减曲线具有快速和慢速两个明显不同阶段的特点，假定页岩内部具有两级渗流通道和空间，可分别提取两级空间的孔隙度和渗透率，所提取的孔、渗参数正演计算的结果较现有方法与实测值更为吻合，有助于深入认识页岩气储集空间孔、渗特征，为储层评价提供更全面和准确的参数。

附图说明

[0037] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现

有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明实施例中记载的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0038] 图1为本发明实施例的一种颗粒样品两级渗透率的获取方法的实施流程示意图。

具体实施方式

[0039] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0040] 为便于对本发明实施例的理解，下面将结合附图以具体实施例做进一步的解释说明，实施例并不构成对本发明实施例的限定。

[0041] 如图1所示，为本发明实施例提供的一种颗粒样品两级渗透率的获取方法的实施流程示意图，该方法具体可以包括以下步骤：

[0042] 步骤1、获取压力随时间变化的曲线P(t)、基准腔体积V_b、放入样品前样品腔体积V_s、样品总体体积V_{sb}、颗粒平均半径R_a、测试温度T、测试阀开启前基准腔的气体密度ρ_1和样品腔的气体密度ρ_0；

[0043] 步骤2、基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2、样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0}，其中计算公式如下：

[0044] $$V_p=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)-\rho_2\left(V_b+V_s-V_{sb}\right)}{\left(\rho_2-\rho_0\right)}$$

[0045] $$\phi=\frac{V_p}{V_{sb}}$$

[0046] $$K_c=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_p}$$

[0047] $$\rho_{c0}=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}+V_p\right)}{V_b+V_s-V_{sb}+V_p}$$

[0048] 步骤3、确定气体开始进入样品对应的压力P_3，其中由公式确定$\rho_3=\frac{\rho_1V_b+\rho_0\left(V_s-V_{sb}\right)}{V_b+V_s-V_{sb}}$，基于氦气状态方程由$\rho_3$和温度T计算$P_3$。

[0049] 从所述压力随时间变化的曲线P(t)中确定压力P_3对应的时刻t_3，所有测点时间值以t_3为零点重新计算，取时间大于t_3的第一个测点，其时间记为t_4，对应的压力记为P_4。

[0050] 步骤4、选择所有大于所述时刻t_3的测点(即选取所有时间大于等于t_4的测点)，基于氦气状态方程计算气体密度ρ(t)和质量分数$F_R(t)$，对$\ln(F_R(t))$中所有大于所述时刻t_3的测点(即所有时间大于等于t_4的测点)和时间t进行线性拟合，得到斜率s_1，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0，其中根据公式计算渗透率k_0；

[0051] $$F_R(t)=1-\frac{(K_c+1)(\rho_{c0}-\rho(t))}{\rho_{c0}-\rho_0}$$

[0052] $$k_0=-\frac{R_a^2\phi\mu c_g s_1}{\alpha_1^2}$$

[0053] 其中R_a为颗粒样品的半径；μ为气体的粘性系数，c_g为气体压缩系数；α_1为超越方程$\tan\alpha=\frac{3\alpha}{3+K_c\alpha^2}$的1次根。

[0054] 步骤5、确定渗透率k′，求解如下方程：

[0055] $$F_R(t_4)=6K_c(K_c+1)e^{-\frac{k'\alpha_n^2 t_4}{\mu c_g\phi R_a^2}}\frac{1}{K_c^2\alpha_1^2+9(K_c+1)}$$

[0056] 步骤6、设定i的初始值为4；

[0057] 步骤7、以第i个测点为界，将压力衰减曲线分为两段：第i个测点及以前的测点记为A段，压力衰减曲线为$P_A(t)$；第i个测点及以后的测点记为B段，压力衰减曲线为$P_B(t)$，该衰减曲线的时间以第i个测点的时间t_i为零点重新计算；

[0058] 步骤8、基于氦气状态方程、第i个测点的压力P_i和温度T，计算对应的气体密度ρ_i，计算A段的孔隙体积V_{pA}、孔隙度Φ_A、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cA}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0A}，其中计算公式如下：

[0059] $$V_{pA}=\frac{\rho_1 V_b+\rho_0(V_s-V_{sb})-\rho_i(V_b+V_s-V_{sb})}{(\rho_i-\rho_0)}$$

[0060] $$\phi_A=\frac{V_{pA}}{V_{sb}}$$

[0061] $$K_{cA}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}}{V_{pA}}$$

[0062] $\rho_{c0A}=\rho_{c0}$

[0063] 步骤9、输入$(k_A(i),D_{2A}(i))=f(P_A(t),K_{cA},\rho_{c0A},\rho_0,R_a,\Phi_A,k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_A(i)$和最小偏差平方和$D_{2A}(i)$；

[0064] 步骤10、计算B段的孔隙体积V_{pB}、孔隙度$\Phi_B(i)$、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_{cB}和测试阀未开启时颗粒外部空间(含基准腔)的气体平均密度ρ_{c0B}，其中计算公式如下：

[0065] $\Phi_B(i)=\Phi-\Phi_A$

[0066] $V_{pB}=V_{sb}\cdot\Phi_B(i)$

[0067] $$K_{cB}=\frac{V_b+V_s-V_{sb}+V_{pA}}{V_{pB}}$$

[0068] $\rho_{c0B}=\rho_i$

[0069] 步骤11、输入$(k_B(i),D_{2B}(i))=f(P_B(t),K_{cB},\rho_{c0B},\rho_0,R_a,\Phi_B(i),k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_B(i)$和最小偏差平方和$D_{2B}(i)$；

[0070] 步骤12、计算总的最小偏差平方和$D_2(i)=D_{2A}(i)+D_{2B}(i)$；

[0071] 步骤13、如果$i\leqslant N-3$，执行步骤7，否则执行步骤14；

[0072] 步骤14、选择$D_2(i)$，$i=4:N-3$中最小值对应的i，记为i_m，对应的$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$即为两级渗流通道的渗透率值，对应的$\Phi-\Phi_B(i_m)$和$\Phi_B(i_m)$即为两级渗流通道控制的孔隙体积占样品总体积的百分比。

[0073] 本发明实施例提供的技术方案，针对现有的颗粒样品渗透率测试中发现的部分样品的压力衰减曲线具有快速和慢速两个明显不同阶段的特点，假定页岩内部具有两级渗流通道和空间，可分别提取两级空间的孔隙度和渗透率，所提取的孔、渗参数正演计算的结果较现有方法与实测值更为吻合，有助于深入认识页岩气储集空间孔、渗特征，为储层评价提供更全面和准确的参数。

[0074] 其中，对于利用$(k_A(i),D_{2A}(i))=f(P_A(t),K_{cA},\rho_{c0A},\rho_0,R_a,\Phi_A,k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_A(i)$和最小偏差平方和$D_{2A}(i)$，利用$(k_B(i),D_{2B}(i))=f(P_B(t),K_{cB},\rho_{c0B},\rho_0,R_a,\Phi_B(i),k_0,k')$求得对应的渗透率最优解$k_B(i)$和最小偏差平方和$D_{2B}(i)$，可以参照“一种颗粒样品渗透率的获取方法”的如下步骤：

[0075] 获得压力随时间变化的曲线P(t)，基准腔体积V_b、放入样品前样品腔体积V_s、样品总体体积V_{sb}、颗粒平均半径R_a、测试温度T、测试阀开启前基准腔的气体密度ρ_1和样品腔的气体密度ρ_0；

[0076] 基于氦气状态方程、压力衰减曲线P(t)最终稳定值P_2和温度T，计算对应的气体密度ρ_2，并计算样品孔隙体积V_P、孔隙度Φ、颗粒样品外部空间和内部孔隙空间的体积比K_c和测试阀未开启时颗粒外部空间的气体平均密度ρ_{c0}；

[0077] 确定气体开始进入样品对应的压力P_3，从所述压力随时间变化的曲线P(t)中确定压力P_3对应的时刻t_3；

[0078] 选择所有大于所述时刻t_3的测点，基于氦气状态方程计算气体密度$\rho(t)$和质量分数$F_R(t)$，对$\ln(F_R(t))$中所有大于所述时刻t_3的测点和时间t进行线性拟合，得到斜率s_1，根据所述斜率s_1计算渗透率k_0；

[0079] 确定渗透率k′，设定K1为k_0和k′的最小值，K3为k_0和k′的最大值，其中，$K2=(K1+K3)/2$；

[0080] 将K1、K2、K3分别输入预设的质量分数计算算法，计算大于T3时刻的所有测点的质量分数值FR1(t)、FR2(t)和FR3(t)，并分别计算FR1(t)、FR2(t)和FR3(t)与实测$F_R(t)$之差的平方和，记为D1、D2和D3；

[0081] 如果D2为D1、D2和D3中的最小值且D1、D2和D3中的最大两两相对偏差小于设定值，则确定渗透率为K2。

[0082] 专业人员应该还可以进一步意识到，结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤，能够以电子硬件、计算机软件或者二者的结合来实现，为了清楚地说明硬件和软件的可互换性，在上述说明中已经按照功能一般性地描述了各示例的组成及步骤。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行，取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能，但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

[0083] 结合本文中所公开的实施例描述的方法或算法的步骤可以用硬件、处理器执行的

软件模块，或者二者的结合来实施。软件模块可以置于随机存储器(RAM)、内存、只读存储器(ROM)、电可编程ROM、电可擦除可编程ROM、寄存器、硬盘、可移动磁盘、CD-ROM、或技术领域内所公知的任意其它形式的存储介质中。

[0084] 以上所述的具体实施方式，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施方式而已，并不用于限定本发明的保护范围，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

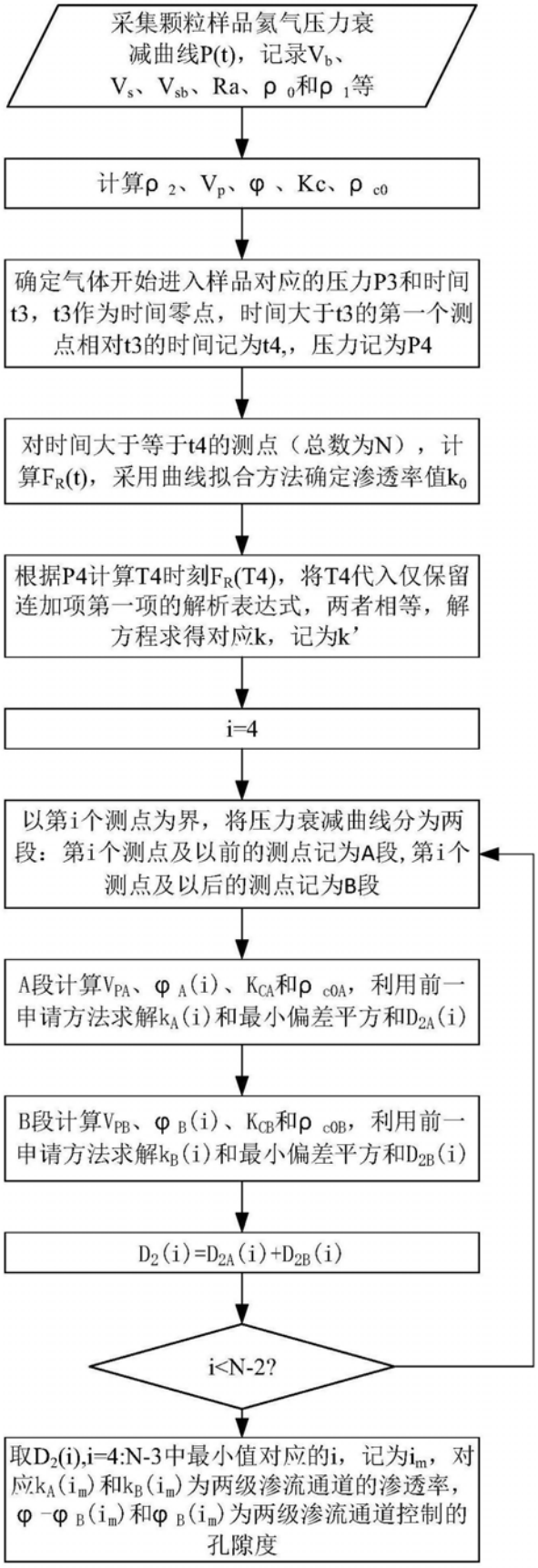

采集颗粒样品氦气压力衰减曲线P(t)，记录V_b、V_s、V_{sb}、Ra、ρ_0和ρ_1等
计算ρ_2、V_p、φ、Kc、ρ_{c0}
确定气体开始进入样品对应的压力P3和时间t3，t3作为时间零点，时间大于t3的第一个测点相对t3的时间记为t4,，压力记为P4
对时间大于等于t4的测点（总数为N），计算$F_R(t)$，采用曲线拟合方法确定渗透率值k_0
根据P4计算T4时刻$F_R(T4)$，将T4代入仅保留连加项第一项的解析表达式，两者相等，解方程求得对应k，记为k'
i=4
以第i个测点为界，将压力衰减曲线分为两段：第i个测点及以前的测点记为A段,第i个测点及以后的测点记为B段
A段计算V_{PA}、$\varphi_A(i)$、K_{CA}和ρ_{c0A}，利用前一申请方法求解$k_A(i)$和最小偏差平方和$D_{2A}(i)$
B段计算V_{PB}、$\varphi_B(i)$、K_{CB}和ρ_{c0B}，利用前一申请方法求解$k_B(i)$和最小偏差平方和$D_{2B}(i)$
$D_2(i)=D_{2A}(i)+D_{2B}(i)$
i<N-2?
取$D_2(i)$,i=4:N-3中最小值对应的i，记为i_m，对应$k_A(i_m)$和$k_B(i_m)$为两级渗流通道的渗透率，$\varphi-\varphi_B(i_m)$和$\varphi_B(i_m)$为两级渗流通道控制的孔隙度

图1