



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109916799 B

(45) 授权公告日 2021.04.20

(21) 申请号 201910223463.7

(22) 申请日 2019.03.22

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109916799 A

(43) 申请公布日 2019.06.21

(73) 专利权人 西南石油大学  
地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72) 发明人 李闽 赵婷 梁斌

(74) 专利代理机构 成都金英专利代理事务所  
(普通合伙) 51218

代理人 袁英

(51) Int. Cl.

G01N 15/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 108896599 A, 2018.11.27

CN 208171813 U, 2018.11.30

CN 206410978 U, 2017.08.15

CN 106814018 A, 2017.06.09

CN 105631529 A, 2016.06.01

CN 104484550 A, 2015.04.01

CN 106093299 A, 2016.11.09

CN 208155804 U, 2018.11.27

CN 206609743 U, 2017.11.03

CN 104007021 A, 2014.08.27

CN 105443120 A, 2016.03.30

审查员 程丹

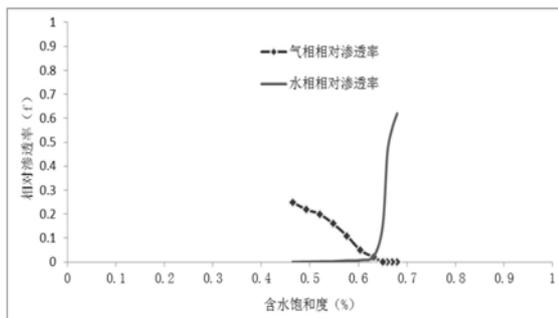
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法

(57) 摘要

本发明公开了测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,包括:(1)将取自致密气藏储层的岩心洗净、烘干后,测量其直径D、长度L、原始孔隙度 $\phi_0$ ; (2)获得岩心的绝对渗透率 $K_0$ 和有效孔隙体积 $V_p$ ; (3)将饱和地层水后的岩心放入岩心夹持器中,加围压,升温至地层温度; (4)向岩心中注入氮气,驱替至岩心出口端水计量管的水量不再增加时停止; (5)在水驱压差 $\Delta P$ 下,将水缓慢注入到岩心夹持器中,进行自发渗吸水驱气实验,计算岩心的水相相对渗透率 $K_{rw}$ 、气相相对渗透率 $K_{rg}$ 和含水饱和度 $S_w$ ,得到致密气藏岩心自发渗吸水驱气过程的气水两相相对渗透率曲线。本发明为致密气藏残余气饱和度的测定和储量的计算提供了理论依据。



1. 测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法, 利用水驱气实验装置完成, 该装置由岩心夹持器(1)、核磁共振仪(2)、入口压力表(4)、出口压力表(5)、气源(18)、水驱替泵(7)、围压泵(3)、回压泵(17)、气水分离器(11)、恒温箱(19)组成, 所述装有全直径岩心的岩心夹持器(1)连接核磁共振仪(2)并位于恒温箱(19)内, 岩心夹持器入口端分别通过入口压力表(4)连接气源(18)和水驱替泵(7), 水驱替泵依次连有液体流量计(8)、中间容器(9)、水容器(10), 岩心夹持器还连接围压泵(3), 岩心夹持器的出口端分别通过出口压力表(5)连接回压泵(17)和气水分离器(11), 气水分离器连有水计量管(16)和气计量管(15), 该方法依次包括以下步骤:

(1) 将取自致密气藏储层的全直径岩心洗净、烘干后, 测量其直径 $D$ 、长度 $L$ 、原始孔隙度 $\phi_0$ ;

(2) 对岩心进行气测渗透率, 获得岩心的绝对渗透率 $K_0$ , 称取干岩心重量 $W_1$ , 再将称重后的岩心放入真空泵中, 抽空4个小时, 将岩心饱和地层水后继续抽空, 直到岩心中无气泡溢出时停止, 地层水的密度为 $\rho_w$ , 称取饱和地层水之后的岩心重量 $W_2$ , 从而求出岩心的有效孔隙体积 $V_p$ :

$$V_p = \frac{W_2 - W_1}{9.8\rho_w};$$

(3) 将饱和地层水后的岩心放入岩心夹持器中, 利用围压泵给岩心夹持器加围压, 升高恒温箱的温度至地层温度 $T_0$ , 测得该岩心夹持器的死孔隙体积 $V_d$ ;

(4) 打开气源, 升高驱替压力至模拟地层压力 $P_w$ , 向岩心中注入氮气, 驱替至岩心出口端水计量管的水量不再增加时停止, 从入口压力表、出口压力表、气计量管、水计量管得到入口压力 $P_1$ 、出口压力 $P_2$ 、气体体积流量 $V_g$ 、岩心内被驱出水的体积 $V_w$ , 计算束缚水饱和度 $S_{ws}$ 、束缚水饱和状态下岩心气相有效渗透率 $K_g$ 、束缚水饱和度下岩心孔隙体积 $V_{p1}$ ;

(5) 关闭气源, 打开岩心夹持器入口端的水驱替泵, 在水驱压差 $\Delta P$ 下, 将水容器中的水通过中间容器, 缓慢注入到岩心夹持器中, 进行自发渗吸水驱气实验, 水驱压差 $\Delta P$ 按如下公式计算:

$$\Delta P = \frac{\sigma_{gw}}{58.8\sqrt{K_0/\phi_0}}$$

式中: $\sigma_{gw}$ 为气水界面张力;

通过读取时间间隔 $\Delta t$ 内气计量管中的产气量 $Q_g$ 和水计量管中的产水量 $Q_w$ , 通过核磁共振仪得到岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ , 计算岩心的水相相对渗透率 $K_{rw}$ 、气相相对渗透率 $K_{rg}$ 和含水饱和度 $S_w$ (%) :

$$K_{rw} = \frac{Q_w \mu_w L}{A \Delta p}$$

$$K_{rg} = \frac{Q_g \mu_g L}{A \Delta p}$$

$$S_w = \frac{\rho_w W_3 - \rho_g Q_g}{V_p \rho_w}$$

式中: $\mu_w$ 、 $\mu_g$ 分别为在测定温度下水相、气相粘度,  $\rho_w$ 、 $\rho_g$ 分别为水相、气相密度;  $L$ 为岩心

长度,A为岩心横截面积;

从而得到致密气藏岩心自发渗吸水驱气过程的气水两相相对渗透率曲线。

2.如权利要求1所述的测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,其特征在于,所述步骤(5)中,通过核磁共振仪得到岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ ,是指:核磁共振 $T_2$ 谱曲线与弛豫时间 $t$ 围成的封闭面积的大小反映 $H^+$ 的变化量,在时间间隔 $\Delta t$ ,通过该封闭面积的变化得知岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ 。

3.如权利要求1所述的测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,其特征在于,所述步骤(5)中,岩心吸入水量等于被驱出的气体量,通过核磁共振 $T_2$ 谱曲线面积变化得到累计驱替的气体量 $Q_1$ ,通过气计量管收集到累计排出的气体量 $Q_2$ ,将 $Q_1$ 和 $Q_2$ 做对比,

直到 $\left|1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right| \times 100\% < 3\%$ 时结束实验。

## 测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及非常规气藏水驱开发过程中,测量自发渗吸相对渗透率的实验方法。

### 背景技术

[0002] 近几年来,随着对可持续发展以及能源需求的要求越来越高,非常规天然气资源在国际上受到了越来越多的重视。我国具有丰富的非常规天然气资源,非常规天然气资源规模庞大且远远大于常规天然气资源,占全球总油气资源量超过80%。但是其开发和利用与许多发达国家相比仍然处于起步阶段。致密气藏的开发无疑将有助于缓解全球油气供应的紧张局面,不仅具有经济效益,而且有利于改善环境,满足我国可持续发展的战略要求。我国非常规油气资源潜力大,开发前景好,是我国油气勘探开发的一个重要方向。

[0003] 随着致密气藏的不断开发以及技术水平的不断提高,确定致密岩石的相对渗透率曲线,获得方法主要有两种:一种是通过实验直接测量(方建龙.高温高压致密砂岩储集层气水相渗曲线测试方法.石油勘探与开发.2015,42(1):84-87),另一种是根据毛管压力数据进行理论计算(许焕昌.渗吸相对渗透率的计算及其应用.大庆石油地质与开发.1987,6(3):37-42)。

[0004] 自发渗吸过程是水驱开发过程中十分重要的一个部分,许多国内外专家学者针对上述问题进行了深入的研究(薛洪刚.LFS低渗致密凝析气藏渗流及储层伤害研究(D).西南石油大学.2017;周凤军.低渗透岩心渗吸实验研究.复杂油气藏.2009,2(1):54-56),由于致密气藏岩石物性复杂、渗流规律异常等特点,往往存在水相圈闭损害严重,启动压力梯度高,注入困难等问题。

[0005] 自发渗吸气水相对渗透率测量是监测和评价水驱开发效率的一个重要参数,该相渗曲线的获得通常采用室内实验测试方法,但由于致密气藏孔喉结构复杂,非均质性强,现有实验测试装置及方法所获得的气水相对渗透率曲线误差较大。因此,如何合理准确地测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率,对深入认识及研究致密气藏气水渗流机理有重要意义。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种用于测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,该方法原理可靠,操作简便,为致密气藏残余气饱和度的测定和储量的计算提供了理论依据,对提高非常规致密气藏的气体采收率具有重要意义。

[0007] 为达到以上技术目的,本发明采用以下技术方案。

[0008] 本发明运用核磁共振仪测量在毛细管压力作用下吸入水的波及程度,利用气体流动监测仪观察气体流动状态,采用排水采气方法收集排驱气体,将所收集气体与核磁共振测量结果做对比,降低自吸相对渗透率的测量误差,使得所测量的气水相对渗透率数据更加准确可靠。

[0009] 用于测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,利用水驱气实验装置

完成, 该装置由岩心夹持器、核磁共振仪、气源、水驱替泵、围压泵、回压泵、气水分离器、恒温箱组成, 所述装有全直径岩心的岩心夹持器连接核磁共振仪并位于恒温箱内, 岩心夹持器入口端分别通过入口压力表连接气源和水驱替泵, 水驱替泵依次连有液体流量计、中间容器、水容器, 岩心夹持器还连接围压泵, 岩心夹持器的出口端分别通过出口压力表连接回压泵和气水分离器, 气水分离器既连有水计量管, 还连有玻璃管、气计量管, 玻璃管连接气体流动监测仪, 气计量管位于水槽中, 该方法依次包括以下步骤:

[0010] (1) 将取自致密气藏储层的全直径岩心洗净、烘干后, 测量其直径 $D$ 、长度 $L$ 、原始孔隙度 $\phi_0$ ;

[0011] (2) 对岩心进行气测渗透率, 获得岩心的绝对渗透率 $K_0$ , 称取干岩心重量 $W_1$ , 再将称重后的岩心放入真空泵中, 抽空4个小时, 将岩心饱和地层水后继续抽空, 直到岩心中无气泡溢出时停止, 地层水的密度为 $\rho_w$ , 称取饱和地层水之后的岩心重量 $W_2$ , 从而求出岩心的有效孔隙体积 $V_p$ :

$$[0012] \quad V_p = \frac{W_2 - W_1}{9.8\rho_w};$$

[0013] (3) 将饱和地层水后的岩心放入岩心夹持器中, 利用围压泵给岩心夹持器加围压, 升高恒温箱的温度至地层温度 $T_0$ , 测得该岩心夹持器的死孔隙体积 $V_d$ ;

[0014] (4) 打开气源, 升高驱替压力至模拟地层压力 $P_w$ , 向岩心中注入氮气, 驱替至岩心出口端水计量管的水量不再增加时停止, 从入口压力表、出口压力表、气计量管、水计量管分别可以得到入口压力 $P_1$ 、出口压力 $P_2$ 、气体体积流量 $V_g$ 、岩心内被驱出水的体积 $V_w$ , 利用 $S_{ws} = \frac{V_p - V_w}{V_p} \times 100\%$  计算束缚水饱和度 $S_{ws}$ , 利用下式计算束缚水饱和状态下岩心气相有效渗透率 $K_g$  (何更生. 油层物理. 石油工业出版社. 2011):

$$[0015] \quad K_g = \frac{2V_g P_0 \mu L}{10A (P_1 - P_2) (P_1 + P_2)}$$

[0016] 式中:  $\mu$ —气体粘度, mPa·s,

[0017]  $L$ —岩心长度, cm,

[0018]  $A$ —岩心横截面积,  $\text{cm}^2$ ,

[0019]  $P_0$ —大气压, MPa;

[0020] 利用下式计算束缚水饱和度下岩心孔隙体积 $V_{p1}$  (易敏. 非稳态法水驱气相对渗透率曲线实验. 天然气工业. 2007, 27 (10): 92-94):

$$[0021] \quad V_{p1} = \frac{P_0}{P_w} V_g - V_d;$$

[0022] (5) 关闭气源, 打开岩心夹持器入口端的水驱替泵, 在水驱压差 $\Delta P$ 下, 将水容器中的水通过中间容器, 缓慢注入到岩心夹持器中, 进行自发渗吸水驱气实验, 通过读取时间间隔 $\Delta t$ 内气计量管中的产气量 $Q_g$ 和水计量管中的产水量 $Q_w$ , 通过核磁共振仪得到岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ , 计算岩心的水相相对渗透率 $K_{rw}$ 、气相相对渗透率 $K_{rg}$ 和含水饱和度 $S_w$  (%):

$$[0023] \quad K_{rw} = \frac{Q_w \mu_w L}{A \Delta p}$$

$$[0024] \quad K_{rg} = \frac{Q_g \mu_g L}{A \Delta p}$$

$$[0025] \quad S_w = \frac{\rho_w W_3 - \rho_g Q_g}{V_p \rho_w}$$

[0026] 式中： $\mu_w$ 、 $\mu_g$ 分别为在测定温度下水相、气相粘度， $\rho_w$ 、 $\rho_g$ 分别为水相、气相密度；从而得到致密气藏岩心自发渗吸水驱气过程的气水两相相对渗透率曲线。

[0027] 所述步骤(5)中按如下公式计算水驱压差 $\Delta P$ (易敏.非稳态法水驱气相对渗透率曲线实验.天然气工业.2007,27(10):92-94):

$$[0028] \quad \Delta P = \frac{\sigma_{gw}}{58.8 \sqrt{K_0 / \phi_0}}$$

[0029] 式中： $\sigma_{gw}$ —气水界面张力。

[0030] 所述步骤(5)中,通过核磁共振仪得到岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ ,是指:由于核磁共振 $T_2$ 谱曲线与横坐标(弛豫时间 $t$ )围成的封闭面积的大小反映 $H^+$ (水电离出的 $H^+$ )的变化量,在时间间隔 $\Delta t$ ,可以通过该封闭面积的变化得知岩心孔隙中自吸水量 $W_3$ 。

[0031] 所述步骤(5)中,由于岩心孔隙吸入水之后,将原本赋存于孔隙中的的气体驱出,所以吸入水量等于被驱出的气体量,通过核磁共振 $T_2$ 谱曲线面积变化得到累计驱替的气体量 $Q_1$ ,通过气计量管收集到累计排出的气体量 $Q_2$ ,将 $Q_1$ 和 $Q_2$ 做对比,直到

$$\left| \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\% \right| < 3\% \text{ 时结束实验。}$$

[0032] 本发明通过在岩心夹持器上连接核磁共振仪,可以观察渗吸过程中水在致密气藏岩心内部的分布规律,通过 $T_2$ 谱曲线与弛豫时间之间所构成封闭面积的变化量,得知吸入水量,岩心孔隙中吸入的水将原本赋存于孔隙中的气体排出,吸入水量和排出气体量相等;气计量管位于水槽中,通过排水采气方法计量排出的气体量;岩心夹持器位于恒温箱内,实验温度保持不变。

[0033] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0034] 1.常规气水相渗曲线获得的实验方法常采用气驱水实验,本发明通过在水驱气实验过程中,采用合理的水驱压差 $\Delta P$ ,充分发挥毛细管力,得到渗吸型气、水的相对渗透率曲线,计算所得残余气饱和度明显增加;

[0035] 2.现有水驱气实验装置中,由于管道中原有气体以及仪器密封性等的影响,气体计量不准确导致实验结果误差较大,本发明将核磁共振计算气体量 $Q_1$ 和气计量管累计气

体量 $Q_2$ 对比,直到 $\left| \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\% \right| < 3\%$ 时,实验结束,此时根据实验结果计算水相、气相的相对渗透率值误差较小。

## 附图说明

[0036] 图1为用于测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验装置的结构示意图。

[0037] 图2为水驱气过程气水两相相对渗透率曲线。

[0038] 图中:1.岩心夹持器;2.核磁共振仪;3.围压泵;4.进口压力表;5.出口压力表;6.

节流阀;7.水驱替泵;8.液体流量计;9.中间容器;10.水容器;11.气水分离器;12.玻璃管;13.气体流动监测仪;14.水槽;15.气计量管;16.水计量管;17.回压泵;18.气源;19.恒温箱。

### 具体实施方式

[0039] 下面根据附图和实例进一步说明本发明,以便于本技术领域的技术人员理解本发明。但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,均在保护之列。

[0040] 测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验方法,利用水驱气实验装置完成,该装置(见图1)由岩心夹持器1、核磁共振仪2、入口压力表4、出口压力表5、气源18、水驱替泵7、围压泵3、回压泵17、气水分离器11、恒温箱19组成,所述装有全直径岩心的岩心夹持器1连接核磁共振仪2并位于恒温箱19内,岩心夹持器入口端分别通过入口压力表4、节流阀6连接气源18和水驱替泵7,水驱替泵7依次连有液体流量计8、中间容器9、水容器10,岩心夹持器还连接围压泵3,岩心夹持器的出口端分别通过出口压力表5连接回压泵17和气水分离器11,气水分离器11连有水计量管16和玻璃管12、气计量管15,玻璃管12连接气体流动监测仪13,气计量管15位于水槽14中。

[0041] 一种测量非常规致密气藏自发渗吸相对渗透率的实验流程如下:

[0042] (1) 将取得的某非常规致密气藏实际全直径岩心洗净、烘干后,测量其直径 $D=70\text{cm}$ 、长度 $L=10\text{cm}$ 、孔隙度 $\phi_0=8.5\%$ 、气测绝对渗透率 $K_0=3.5\text{mD}$ 、然后用甲苯加酒精进行抽提清洗,清洗干净后烘干,然后称取干岩心重量 $W_1=40\text{kg}$ ,再将称取干重的岩心放入真空泵中,抽空4个小时,将岩心饱和地层水(密度为 $\rho_w$ )后再继续抽空,直到岩心中无气泡溢出时停止,称取饱和水之后的岩心重量 $W_2=43.4\text{kg}$ ,根据饱和液体密度求出岩心的孔隙体积:

$$[0043] \quad V_p = \frac{W_2 - W_1}{9.8\rho_w} = 350 \text{ (ml)}$$

[0044] (2) 将饱和水后的岩心放入岩心夹持器1中,该岩心夹持器1死孔隙体积为 $V_d=9.89\text{ml}$ ,在室温下将水容器10和水槽14中充满地层水,气源18为氮气瓶(36MPa),关闭所有的阀门,将各个仪器按照图1所示连接起来。

[0045] (3) 在仪器安装完成之后,利用围压泵3给岩心夹持器1加围压,并且升高恒温箱19的温度至地层温度 $T_0=120^\circ\text{C}$ 。

[0046] (4) 打开气源18,升高驱替压力至模拟地层压力 $P_w=36\text{MPa}$ ,向岩心中注入氮气(保持注入压力恒为 $0.6\text{MPa}$ ),驱替至岩心出口端水计量管16中水量不再增加,停止气驱。记录此时入口压力表4读数 $P_1=35.8\text{MPa}$ 、出口压力表5的读数 $P_2=33.6\text{MPa}$ ,气体体积流量 $V_g=5*10^4\text{ml}$ ,岩石内被驱出水的体积为 $V_w=189.7\text{ml}$ ,计算束缚水饱和度 $S_{ws}$ ,并利用达西公式计算束缚水饱和状态下岩心气相渗透率 $K_g$ :

$$[0047] \quad S_{ws} = \frac{V_p - V_w}{V_p} \times 100\% = \frac{350 - 189.7}{350} \times 100\% = 45.8\%$$

$$[0048] \quad K_g = \frac{2V_g P_0 \mu_g L}{10A (P_1 - P_2) (P_1 + P_2)} = \frac{2 \times 5 \times 10^4 \times 0.1 \times 17.8 \times 10}{10 \times 3.14 \times 0.25 \times 70^2 \times (35.8 - 33.6) \times (35.8 + 33.6)} = 0.303\text{mD}$$

[0049] 恒温下,束缚水饱和度下岩心孔隙6) 体积为:

$$[0050] \quad V_{p1} = \frac{P^0}{P_w} V_g - V_d = \frac{0.1}{36} * 5 * 10^4 - 9.89 = 129 \text{ml}$$

[0051] (5) 关闭气源节流阀6, 打开岩心夹持器1入口端的水样驱替泵7, 在驱替压差

$$\Delta P = \frac{\sigma_{gw}}{58.8\sqrt{K_0/\phi_0}} = \frac{72.5}{58.8\sqrt{3.5/8.5}} = 1.92 \text{MPa}$$

下, 将水容器10中的水通过中间容器9, 液体计

量计8和驱替泵7缓慢注入到岩心夹持器1中, 进行自发渗吸水驱气实验。实验过程中, 核磁共振 $T_2$ 谱曲线与横坐标(驰豫时间s) 围成封闭的面积, 该封闭面积的大小主要反映 $H^+$ (水电离出的 $H^+$ ) 的变化量。在时间间隔 $\Delta t$ 中, 通过核磁共振 $T_2$ 谱曲线与横坐标(驰豫时间s) 围成封闭面积的变化读取岩心孔隙中自吸水量 $W_3 = 196 \text{ml}$ 。一段时间 $t$ 之后, 通过核磁共振 $T_2$ 谱曲线面积得到累计驱替的气体量 $Q_1 = 83 \text{ml}$ , 同时通过气计量管收集到的累计排出气体量  $Q_2 =$

85ml, 将 $Q_1$ 和 $Q_2$ 做对比, 直到  $\left| \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\% \right| = 2.4\% < 3\%$ , 实验结束, 计算水相、气相 的相

对渗透率值(见表1), 从而得到水驱气过程气水两相相渗曲线(见图2)。

[0052] 表1岩心水相、气相相对渗透率计算结果

时间 ( $\Delta t$ ) set	Sw (%)	Sg (%)	Krg (%)	Krw (%)
259200	45.8	67.2	0.303	0
432000	49.2	50.8	0.24	0
604800	51.9	48.1	0.2	0
777600	54.6	45.4	0.15	0
950400	57.3	42.7	0.1	0
[0053] 1123200	60.0	40	0.05	0.01
1296000	63.5	36.5	0.02	0.02
1468800	65.0	35	0	0.15
1641600	66.2	33.8	0	0.3
1814400	67.5	32.5	0	0.45
1987200	68.2	31.8	0	0.61

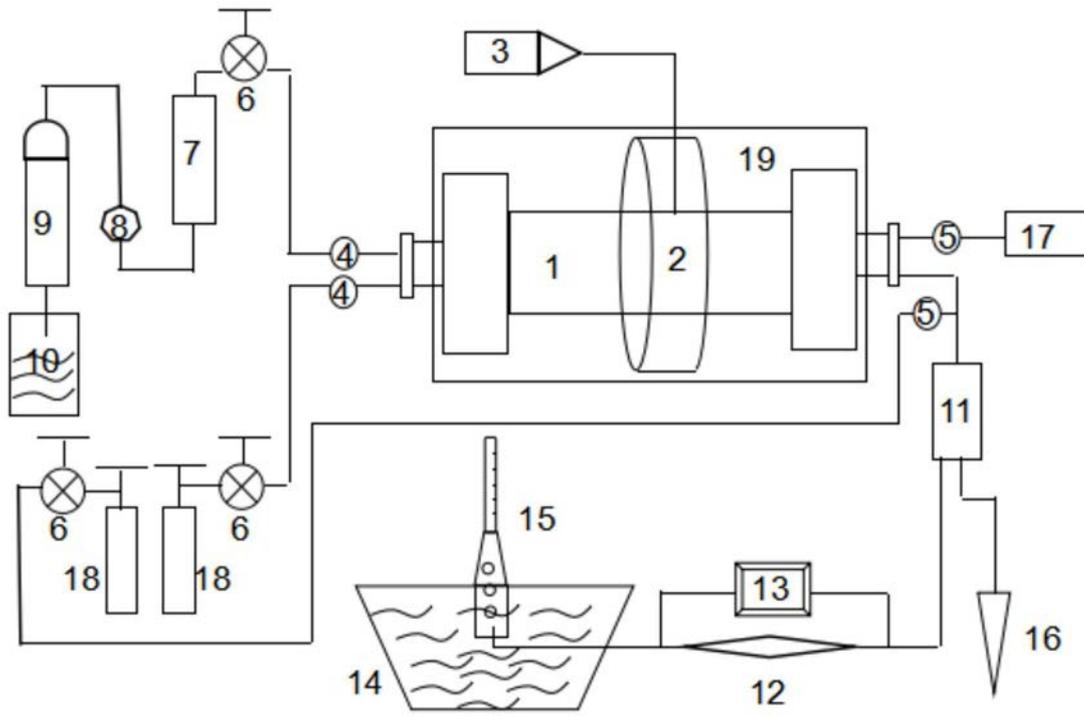


图1

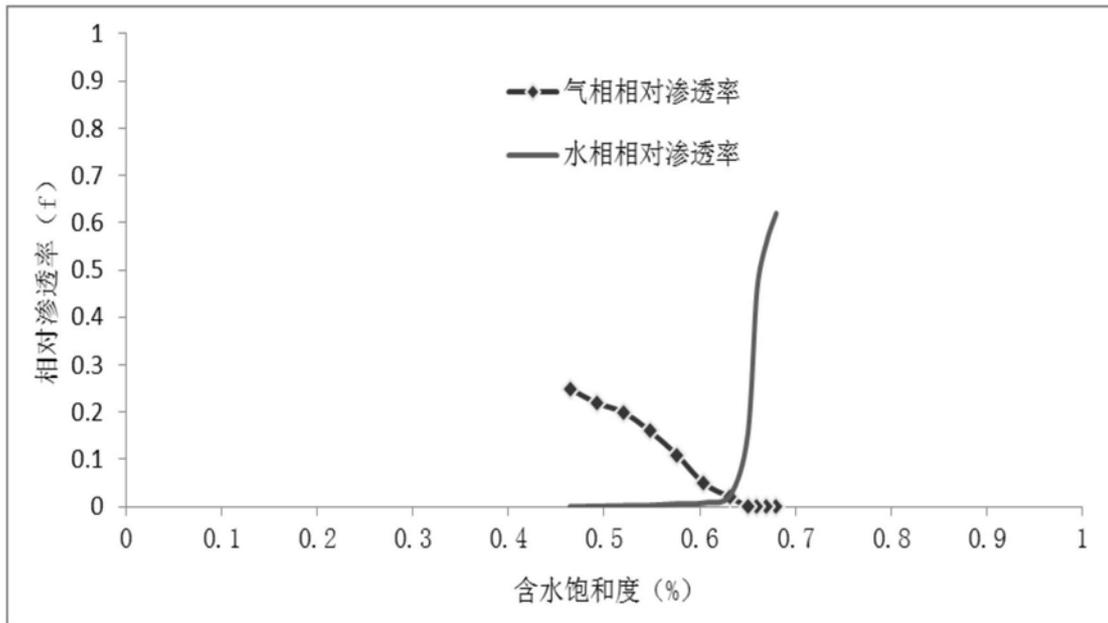


图2