



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103645126 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 19

(21) 申请号 201310639669. 0

(22) 申请日 2013. 12. 02

(71) 申请人 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 郭平 方建龙 杜建芬 汪周华  
罗玉琼 赵春兰 董超 熊燊铭  
郑鑫平 何佳林 涂汉敏 李洋

(74) 专利代理机构 成都金英专利代理事务所  
51218

代理人 袁英

(51) Int. Cl.

G01N 15/08 (2006. 01)

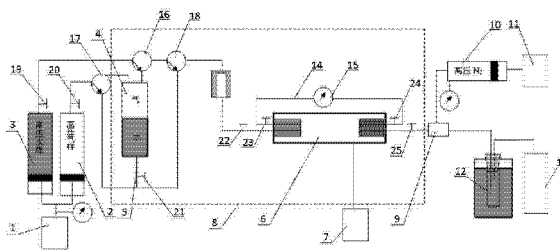
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

地层高温高压气水相渗曲线测定方法

(57) 摘要

本发明公开了地层高温高压气水相渗曲线测定方法,它包括以下步骤:S1、岩心准备;S2、流体准备;S3、平衡气和平衡地层水单脱测试;S4、岩心饱和水;S5、连结流程加温建压;S6、平衡水相渗透率  $K_w$  测试;S7、气驱水过程相渗测试;S8、累积产水量  $W(t)$  及累积产气量  $G(t)$  的校正,将地面条件下记录的值转化到地层条件下;S9、计算各时刻的水相相对渗透率  $K_{rw}$  和气相相对渗透率  $K_{rg}$  以及岩样出口端面含气饱和度  $S_{ge}$ 。本发明的有益效果是:有效模拟了真实气藏地层的高温高压条件,充分考虑了地层高温高压条件岩石和流体的影响,测定结果更符合生产实际,实验数据可利用价值高,克服了现有测定方法的不足。



1. 地层高温高压气水相渗曲线测定方法,其特征在于:它包括以下步骤:

S1、岩心准备,对现场取回的岩心进行抽提、清洗、烘干后测岩心的长度 L、直径 d、岩心孔隙度  $\phi$ 、渗透率 K;

S2、流体准备:根据实际气藏的地层水样分析数据配制地层水;选取实际气藏的天然气样品;在常温下将水样中间容器(3)和气样中间容器(2)分别装满配制的地层水和地层压力下的高压天然气,将气水平衡器(4)装入 50% 体积地层水、并注入 50% 天然气到地层压力下,进行摇动搅拌 4~6 小时,保持在常温下有过量气溶解在水中;

S3、平衡气和平衡地层水单脱测试,测定平衡气的体积系数  $B_g$  和平衡地层水的体积系数  $B_w$  和气水比  $GWR_w$ ;

S4、岩心饱和水;

S5、连结流程加温建压,其包括以下子步骤:

S51、将饱和好的岩心装入夹持器,保持围压比岩心入口压力高,再加温到地层设定温度;

S52、打开控制阀 A (19)、三通阀 A (16)、三通阀 C (18)、控制阀 D (22)、控制阀 E (23)、控制阀 F (24)、控制阀 G (25),用地层水将岩心驱替系统逐步建立到地层压力,所述打开三通阀 A (16) 为接通三通阀 C (18) 和控制阀 A (19),打开三通阀 C (18) 为接通三通阀 A (16) 与控制阀 D (22);

S53、打开控制阀 A (19)、三通阀 A (16),关闭控制阀 B (20)、三通阀 B (17)、打开控制阀 C (21)、三通阀 C (18)、控制阀 D (22)、控制阀 E (23)、控制阀 F (24)、控制阀 G (25),用高压水从上部注入,下部出平衡水将岩心驱替中的水进行置换,所述打开三通阀 A (16) 为连通控制阀 A (19) 和气水平衡器(4) 上端部,关闭三通阀 B (17) 为断开控制阀 B (20) 与气水平衡器(4) 上端部,打开三通阀 C (18) 为连通控制阀 C (21) 和控制阀 D (22);

S6、平衡水相渗透率  $K_w$  测试,

在地层压力温度下继续进行恒压平衡水置换地层水驱,定时测定出口水速度,待岩心进出口的压差  $\Delta p$  (MPa)、出口流量  $Q_w$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) 和气水比达到  $GWR_w$  稳定后,测定水相渗透率  $K_w$ ,以此作为水气相对渗透率的基础;

$$K_w = \frac{Q_w \mu_w L}{10A\Delta p}$$

式中:

$K_w$ ——水测岩样渗透率, mD;

$\mu_w$ ——地层水粘度, mPa·s;

L——岩样长度, cm;

A——岩样横截面积,  $\text{cm}^2$ ,  $A = \frac{1}{4} \pi d^2$ ;

d——岩样直径, cm;

S7、气驱水过程相渗测试,其包括以下子步骤:

S71、关闭控制阀 A (19),控制阀 D (22);打开三通阀 A (16)、控制阀 B (20)、三通阀 B (17)、控制阀 C (21)、三通阀 C (18)、控制阀 E (23)、控制阀 F (24)、控制阀 G (25);所述打开三通阀 A (16) 为接通气水平衡器(4) 上端和三通阀 C (18),打开三通阀 B (17) 为

接通控制阀 B (20) 和控制阀 C (21), 打开三通阀 C (18) 为接通三通阀 A (16) 与控制阀 D (22);

S72、设定好预定恒速或恒压, 启动注入泵(1), 同时打开控制阀 D (22), 开始记录实验数据, 出口通过分离器(12) 进行气水分离, 实验过程保持分离器(12) 淹没在冰水冷凝浴中, 驱替直至不出水为止, 记录各个时刻的岩心两端的进出口压力  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  或压差  $\Delta p(t)$ , 累积产出的水量  $W(t)$  和气量  $G(t)$ ;

S73、气驱水至束缚水状态, 测定束缚水状态下气相有效渗透率后结束实验;

S8、累积产水量  $W(t)$  及累积产气量  $G(t)$  的校正,

将地面条件下记录的值转化到地层条件下,

$$W'(t) = W(t)B_w, G'(t) = G(t) - W(t) \cdot GWR_w B_g,$$

其中:  $W'(t)$  为校正后的累积产水量,  $\text{cm}^3$ ;  $G'(t)$  为校正后的累积产气量,  $\text{cm}^3$ ;

S9、计算各时刻的水相相对渗透率  $K_{rw}$  和气相相对渗透率  $K_{rg}$  以及岩样出口端面含气饱和度  $S_{ge}$ ,

$$f_w(S_g) = \frac{dV_w(t)}{dV(t)},$$

$$K_{rw} = f_w(S_g) \frac{d[1/V(t)]}{d\{1/[I \cdot V(t)]\}},$$

$$K_{rg} = K_{rw} \frac{\mu_g}{\mu_w} \frac{1 - f_w(S_g)}{f_w(S_g)},$$

$$I = \frac{Q(t)}{Q_0} \frac{\Delta p_0}{\Delta p(t)},$$

$$S_{ge} = V_w(t) - V(t) f_w(S_g),$$

$$V_w(t) = \frac{W'(t)}{V_p},$$

$$V(t) = \frac{W'(t) + G'(t)}{V_p},$$

$$Q(t) = \frac{[W'(t) - W'(t-1)] + [G'(t) - G'(t-1)]}{\Delta t},$$

$$\Delta p(t) = p_1(t) - p_2(t),$$

其中:

$f_w(S_g)$ ——含水率, 小数,

$V_w(t)$ ——无因次累积采水量,

$V(t)$ ——无因次累积采水气量,

$K_{rw}$ ——水相相对渗透率, 小数,

$K_{rg}$ ——气相相对渗透率, 小数,

$I$ ——相对注入能力或流动能力比, 无因次,

$Q_0$ ——初始时刻岩样出口端面产水流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,

$Q(t)$ —— $t$  时刻岩样出口端面产水气流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,

$\Delta p_0$ ——初始驱动压差, MPa,

$\Delta p(t)$ —— $t$  时刻驱替压差, MPa,

$S_{ge}$ ——岩样出口端面含气饱和度, 小数,

$\mu_w$ ——地层水粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,

$\mu_g$ ——天然气粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

## 地层高温高压气水相渗曲线测定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及石油天然气勘探开发技术领域一种地层高温高压气水相渗曲线测定方法。

### 背景技术

[0002] 气水相渗是气田开发中的重要基础数据,目前气水相渗测试标准做法是依据标准 SY/T5345-2007 “岩石中两相流体相对渗透率测定方法”在实验室温度条件下应用压缩空气或氮气和地层水(注入水)或标准盐水采用稳态法或非稳态法测得。现有测定方法未考虑地层高温高压条件岩石和流体的影响,无法实现地层条件气水粘度比和界面张力,这与实际地层条件下的渗流条件存在较大的差异,不能真实代表储层气水渗流过程。因此有必要建立符合生产实际的气水相渗测试方法。

[0003] 中国专利 201310121184. 2,公开了一种覆压加温下煤岩孔渗电声应力应变联测装置,该装置设有一个恒温箱,恒温箱内设有支撑杆、综合夹持器、推进平台、垫块及煤样,综合夹持器的上部设有实验油管,实验油管插入煤样中,实验油管的上部依次连接着电磁阀 e、标准室、压力表 b、电磁阀 c、气压调节器及气体增压泵,所述气体增加泵的进口通过导线与气瓶相连接;实验油管的上部依次连接着压力表 c、电磁阀 d、水压调节器、液体增压泵及水箱。该装置可以有效模拟深部复杂地层条件下高温高压的地质环境,在同一个实验条件下得到煤岩样品的孔隙度、气水相对渗透率、应力应变曲线、电阻率和声波速度,有效节约了样品、增加了实验数据精度和可对比性,给科研工作带来极大的便利。但其仍采用传统稳态法测试气水相对渗透率。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的缺点,提供一种提高实验数据可利用价值、实验数据更符合生产实际的地层高温高压气水相渗曲线测定方法。

[0005] 本发明的目的通过以下技术方案来实现:

[0006] 地层高温高压气水相渗曲线测定方法,它包括以下步骤:

[0007] S1、岩心准备,对现场取回的岩心进行抽提、清洗、烘干后测岩心的长度 L、直径 d、岩心孔隙度  $\phi$ 、渗透率 K;

[0008] S2、流体准备:根据实际气藏的地层水样分析数据配制地层水;选取实际气藏的天然气样品;在常温下将水样中间容器和气样中间容器分别装满配制的地层水和地层压力下的高压天然气,将气水平衡器装入 50% 体积地层水、并注入 50% 天然气到地层压力下,进行摇动搅拌 4 ~ 6 小时,保持在常温下有过量气溶解在水中;

[0009] S3、平衡气和平衡地层水单脱测试,测定平衡气的体积系数  $B_g$  和平衡地层水的体积系数  $B_w$  和气水比  $GWR_w$ ;

[0010] S4、岩心饱和水;

[0011] S5、连结流程加温建压,其包括以下子步骤:

[0012] S51、将饱和好的岩心装入夹持器,保持围压比岩心入口压力高,再加温到地层设定温度;

[0013] S52、打开控制阀 A、三通阀 A、三通阀 C、控制阀 D、控制阀 E、控制阀 F、控制阀 G,用地层水将岩心驱替系统逐步建立到地层压力,所述打开三通阀 A 为接通三通阀 C 和控制阀 A,打开三通阀 C 为接通三通阀 A 与控制阀 D;

[0014] S53、打开控制阀 A、三通阀 A,关闭控制阀 B、三通阀 B、打开控制阀 C、三通阀 C、控制阀 D、控制阀 E、控制阀 F、控制阀 G,用高压水从上部注入,下部出平衡水将岩心驱替中的水进行置换,所述打开三通阀 A 为连通控制阀 A 和气水平衡器上端部,关闭三通阀 B 为断开控制阀 B 与气水平衡器上端部,打开三通阀 C 为连通控制阀 C 和控制阀 D;

[0015] S6、平衡水相渗透率  $K_w$  测试,

[0016] 在地层压力温度下继续进行恒压平衡水置换地层水驱,定时测定出口水速度,待岩心进出口的压差  $\Delta p$  (MPa)、出口流量  $Q_w$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) 和气水比达到  $\text{GWR}_w$  稳定后,测定水相渗透率  $K_w$ ,以此作为水气相对渗透率的基础;

$$[0017] \quad K_w = \frac{Q_w \mu_w L}{10A \Delta p}$$

[0018] 式中:

[0019]  $K_w$ ——水测岩样渗透率, mD;

[0020]  $\mu_w$ ——地层水粘度, mPa·s;

[0021]  $L$ ——岩样长度, cm;

[0022]  $A$ ——岩样横截面积,  $\text{cm}^2$ ,  $A = \frac{1}{4} \pi d^2$ ;

[0023]  $d$ ——岩样直径, cm;

[0024] S7、气驱水过程相渗测试,其包括以下子步骤:

[0025] S71、关闭控制阀 A,控制阀 D;打开三通阀 A、控制阀 B、三通阀 B、控制阀 C、三通阀 C、控制阀 E、控制阀 F、控制阀 G;所述打开三通阀 A 为接通气水平衡器上端和三通阀 C,打开三通阀 B 为接通控制阀 B 和控制阀 C,打开三通阀 C 为接通三通阀 A 与控制阀 D;

[0026] S72、设定好预定恒速或恒压,启动注入泵,同时打开控制阀 D,开始记录实验数据,出口通过分离器进行气水分离,实验过程保持分离器淹没在冰水冷凝浴中,驱替直至不出水为止,记录各个时刻的岩心两端的进出口压力  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  或压差  $\Delta p(t)$ ,累积产出的水量  $W(t)$  和气量  $G(t)$ ;

[0027] S73、气驱水至束缚水状态,测定束缚水状态下气相有效渗透率后结束实验;

[0028] S8、累积产水量  $W(t)$  及累积产气量  $G(t)$  的校正,

[0029] 将地面条件下记录的值转化到地层条件下,

[0030]  $W'(t) = W(t) B_w$ ,  $G'(t) = G(t) - W(t) \cdot \text{GWR}_w B_g$ ,

[0031] 其中: $W'(t)$  为校正后的累积产水量,  $\text{cm}^3$ ;  $G'(t)$  为校正后的累积产气量,  $\text{cm}^3$ ;

[0032] S9、计算各时刻的水相相对渗透率  $K_{rw}$  和气相相对渗透率  $K_{rg}$  以及岩样出口端面含气饱和度  $S_{ge}$ ,

$$[0033] \quad f_w(s_g) = \frac{dV_w(t)}{dV(t)},$$

$$[0034] \quad K_{rw} = f_w(S_g) \frac{d[1/V(t)]}{d\{1/[I.V(t)]\}},$$

$$[0035] \quad K_{rg} = K_{rw} \frac{\mu_g}{\mu_w} \frac{1-f_w(S_g)}{f_w(S_g)},$$

$$[0036] \quad I = \frac{Q(t)}{Q_0} \frac{\Delta p_0}{\Delta p(t)},$$

$$[0037] \quad S_{ge} = V_w(t) - V(t) f_w(S_g),$$

$$[0038] \quad V_w(t) = \frac{W'(t)}{V_p},$$

$$[0039] \quad V(t) = \frac{W'(t) + G'(t)}{V_p},$$

$$[0040] \quad Q(t) = \frac{[W'(t) - W'(t-1)] + [G'(t) - G'(t-1)]}{\Delta t},$$

$$[0041] \quad \Delta p(t) = p_1(t) - p_2(t),$$

[0042] 其中：

[0043]  $f_w(S_g)$ ——含水率，小数，

[0044]  $V_w(t)$ ——无因次累积采水量，

[0045]  $V(t)$ ——无因次累积采水气量，

[0046]  $K_{rw}$ ——水相相对渗透率，小数，

[0047]  $K_{rg}$ ——气相相对渗透率，小数，

[0048]  $I$ ——相对注入能力或流动能力比，无因次，

[0049]  $Q_0$ ——初始时刻岩样出口端面产水流量， $\text{cm}^3/\text{s}$ ，

[0050]  $Q(t)$ —— $t$ 时刻岩样出口端面产水气流量， $\text{cm}^3/\text{s}$ ，

[0051]  $\Delta p_0$ ——初始驱动压差，MPa，

[0052]  $\Delta p(t)$ —— $t$ 时刻驱替压差，MPa，

[0053]  $S_{ge}$ ——岩样出口端面含气饱和度，小数，

[0054]  $\mu_w$ ——地层水粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，

[0055]  $\mu_g$ ——天然气粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$

[0056] 本发明具有以下优点：本发明有效模拟了真实气藏地层的高温高压条件，充分考虑了地层高温高压条件岩石和流体的影响，测定结果更符合生产实际，实验数据可利用价值高，通过实验可更接近模拟储层气水渗流过程，提高了实验数据精度，克服了现有测定方法未考虑地层高温高压条件岩石和流体的影响，无法实现地层条件气水粘度比和界面张力，不能真实代表储层气水渗流过程的技术难题。

#### 附图说明

[0057] 图1为本发明的结构示意图

[0058] 图2为本发明用地层水将岩心驱替系统逐步建立到地层压力时的结构示意图

[0059] 图 3 为本发明用平衡水将岩心驱替中的水进行置换时的结构示意图

[0060] 图 4 为本发明用气驱水时的结构示意图

[0061] 图中,1-注入泵,2-气样中间容器,3-水样中间容器,4-气水平衡器,5-管路 A,6-岩心夹持器,7-围压泵,8-恒温箱,9-回压调节器,10-氮气容器,11-回压泵,12-分离器,13-气量计,14-管路 B,15-压差表,16-三通阀 A,17-三通阀 B,18-三通阀 C,19-控制阀 A,20-控制阀 B,21-控制阀 C,22-控制阀 D,23-控制阀 E,24-控制阀 F,25-控制阀 G。

### 具体实施方式

[0062] 下面结合附图对本发明做进一步的描述,本发明的保护范围不局限于以下所述:

[0063] 如图 1 所示,地层高温高压气水相渗曲线测定方法所采用的装置,它包括注入系统、恒温箱 8、岩心夹持器 6、围压泵 7 和回压系统,所述的注入系统包括注入泵 1、两个中间容器和气水平衡器 4,所述的两个中间容器分别为气样中间容器 2 和水样中间容器 3,注入泵 1 分别通过管路与气样中间容器 2 和水样中间容器 3 的一端连通,注入泵 1 的出口管上设置有压力表,水样中间容器 3 的另一端连接三通阀 A16 的一个端口,气样中间容器 2 的另一端连接三通阀 B17 的一个端口,三通阀 A16 和三通阀 B17 的第二端口分别通过管路连通气水平衡器 4 的上端,气水平衡器 4 的下端连接有管路 A5,三通阀 A16 的第三端口连接三通阀 C18,三通阀 C18 的第二端口和三通阀 B17 的第三端口分别通过管路连通管路 A5,三通阀 C18 的第三端口通过管路与岩心夹持器 6 的入口端相连通,岩心夹持器 6 和气水平衡器 4 设置于恒温箱 8 内,岩心夹持器 6 的出口端连通回压系统。

[0064] 所述的回压系统包括回压调节器 9、氮气容器 10、回压泵 11、分离器 12 和气量计 13,岩心夹持器 6 的出口端连通回压调节器 9,回压泵 11 连通氮气容器 10 的一端,氮气容器 10 的另一端连接回压调节器 9,氮气容器 10 连接回压调节器 9 的一端设置有压力表,回压调节器 9 还连通分离器 12,分离器 12 的上部连通气量计 13。

[0065] 所述的气样中间容器 2、水样中间容器 3 和氮气容器 10 均为内部设置有活塞的容器,活塞将容器内部分隔为互不连通的两个腔体。两个腔体中一个与自动泵连接,一个储存样品,所述自动泵为注入泵 1 或回压泵 11,活塞在泵压的作用下推动样品注入。

[0066] 岩心夹持器 6 的入口端和出口端通过管路 B14 连通,管路 B14 上安装有压差表 15,且管路 B14 连通入口端和出口端的两端分别设置有控制阀 E23 和控制阀 F24。

[0067] 所述连接水样中间容器 3 与三通阀 A16 的管路上安装有控制阀 A19、连接气样中间容器 2 与三通阀 B17 的管路上安装有控制阀 B20、管路 A5 上安装有控制阀 C21、连接三通阀 C18 与岩心夹持器 6 的入口的管路上安装有控制阀 D22、连接岩心夹持器 6 与回压调节器 9 的管路上安装有控制阀 G25。

[0068] 所述连接三通阀 C18 与控制阀 D22 的管路上安装有观察窗。

[0069] 该装置设置了气水平衡器,其上部充满天然气,下部充满地层水,这样的设计保持了气水相渗测定过程中天然气与地层水始终处于相平衡状态,同样使得整个测试流程能够很好地模拟实际气藏地层条件。

[0070] 地层高温高压气水相渗曲线测定方法,它包括以下步骤:

[0071] S1、岩心准备,对现场取回的岩心进行抽提、清洗、烘干后测岩心的长度  $L=6.5\text{cm}$ 、直径  $d=6.4\text{cm}$ 、岩心孔隙度  $\phi=5.19\%$ 、渗透率  $K=0.104\text{mD}$ ,并计算岩心的横截面积



$A=32.15\text{cm}^2$  和孔隙体积  $V_p=10.85\text{cm}^3$ ;

[0072] S2、流体准备：根据实际气藏的地层水样分析数据配制地层水；选取实际气藏的天然气样品；在常温下将水样中间容器 3 和气样中间容器 2 分别装满配制的地层水和地层压力下的高压天然气，将气水平衡器 4 装入 50% 体积地层水、并注入 50% 天然气到地层压力下，进行摇动搅拌 4 ~ 6 小时，保持在常温下有过量气溶解在水中；

[0073] S3、平衡气和平衡地层水单脱测试，参考标准 SY/T5543-2002 “凝析气藏流体物性分析方法”，采用配样器注入 50% 高压天然气和 50% 体积地层水，在地层温度压力下充分搅拌平衡，分别将上部平衡气样和下部平衡水样转入到 PVT 仪中测定平衡气的体积系数  $B_g=0.002082$ ，平衡地层水的体积系数  $B_w=0.9845$ ，气水比  $GWR_w=11.8\text{m}^3/\text{m}^3$ ；

[0074] S4、岩心饱和水。按标准方法进行抽空饱和地层水，在常温饱和和水前称岩心干重为  $W_1$ ，饱和水后取出称重为  $W_2$ ，得到饱和水量  $V_w=(W_2-W_1)/\rho_w=10.85\text{ml}$ ，与理论计算值进行比较，确保岩心已饱和水；

[0075] S5、连结流程加温建压，主要目的是防止高压下的水在低压下脱气，同时在流程接好后不用抽空，防止岩心中的水因抽空而损失，同时用未饱和水在高压有较高的溶解度，在常压下的几毫升死体积气很快就被压缩和溶解在水中了，这样可保持岩心中是单相水，再用饱和气的平衡水驱未饱和气的水直到稳定；其包括以下子步骤：

[0076] S51、将饱和好的岩心装入夹持器，并连接好装置，如图 1 所示，保持围压比岩心入口压力高以防止围压流体进入岩心，再加温到地层设定温度；

[0077] S52、打开控制阀 A19、三通阀 A16、三通阀 C18、控制阀 D22、控制阀 E23、控制阀 F24、控制阀 G25，如图 2 所示，用地层水将岩心驱替系统逐步建立到地层压力，所述打开三通阀 A16 为接通三通阀 C18 和控制阀 A19，打开三通阀 C18 为接通三通阀 A16 与控制阀 D22；

[0078] S53、打开控制阀 A19、三通阀 A16，关闭控制阀 B20、三通阀 B17、打开控制阀 C21、三通阀 C18、控制阀 D22、控制阀 E23、控制阀 F24、控制阀 G25，如图 3 所示，用高压水从上部注入，下部出平衡水将岩心驱替中的水进行置换，所述打开三通阀 A16 为连通控制阀 A19 和气水平衡器 4 上端部，关闭三通阀 B17 为断开控制阀 B20 与气水平衡器 4 上端部，打开三通阀 C18 为连通控制阀 C21 和控制阀 D22；

[0079] S6、平衡水相渗透率  $K_w$  测试，

[0080] 在地层压力温度下继续进行恒压平衡水置换地层水驱，定时测定出口水速度，待岩心进出口的压差  $\Delta p$ 、出口流量  $Q_w$  和气水比达到  $GWR_w$  稳定后，测得  $\Delta p=0.5\text{MPa}$ ， $Q_w=1.82\text{cm}^3/\text{s}$ ，同时根据化学化工物性数据手册中地层水粘度与温度压力的关系表进行外推得到在压力为  $116\text{MPa}$ ，温度为  $160^\circ\text{C}$  时，地层水粘度  $\mu_w=0.206\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，

[0081] 测定水相渗透率  $K_w$ ，以此作为水气相对渗透率的基础；

$$[0082] \quad K_w = \frac{Q_w \mu_w L}{10A \Delta p} = 0.0152\text{mD}$$

[0083] 式中：

[0084]  $K_w$ ——水测岩样渗透率，mD；

[0085]  $\mu_w$ ——地层水粘度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，可以实验测式或根据化学化工物性数据手册中地层水粘度与温度压力的关系表进行外推得到；

[0086]  $L$ ——岩样长度，cm；

[0087] A——岩样横截面积,  $\text{cm}^2$ ,  $A = \frac{1}{4} \pi d^2$ ;

[0088] d——岩样直径,  $\text{cm}$ ;

[0089] S7、气驱水过程相渗测试,其包括以下子步骤:

[0090] S71、关闭控制阀 A19,控制阀 D22;打开三通阀 A16、控制阀 B20、三通阀 B17、控制阀 C21、三通阀 C18、控制阀 E23、控制阀 F24、控制阀 G25,如图 4 所示;所述打开三通阀 A16 为接通气水平衡器 4 上端和三通阀 C18,打开三通阀 B17 为接通控制阀 B20 和控制阀 C21,打开三通阀 C18 为接通三通阀 A16 与控制阀 D22;

[0091] S72、设定好预定恒速或恒压,本实施例中采用恒压差 3MPa 进行驱替,启动注入泵 1,同时打开控制阀 D22,开始记录实验数据,出口通过分离器 12 进行气水分离,实验过程保持分离器 12 淹没在冰水冷凝浴中,驱替直至不出水为止,即扣除气中含水量后,没有明显的水量增加,记录各个时刻的岩心两端的进出口压力  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  或压差  $\Delta p(t)$ ,累积产出的水量  $W(t)$  和气量  $G(t)$ ;

[0092] S73、气驱水至束缚水状态,测定束缚水状态下气相有效渗透率后结束实验;

[0093] 记录各个时刻的岩心累积产出的水量  $W(t)$  和气量  $G(t)$  原始数据如表 1:

[0094] 表 1 岩心累积产水量和累积产气量

[0095]

累积时间 t, min	G(t), $\text{cm}^3$	W(t), $\text{cm}^3$
10	29	2.49
20	1185	3.16
35	3558	3.82
51	6538	4.26
57	7663	4.38
66	9309	4.53
124	22051	5.58
130	23763	5.72
138	25647	5.86
146	27585	5.98
162	31050	6.18
176	33768	6.30

186	35679	6.36
216	40696	6.47
265	48091	6.57
286	51054	6.60
352	59768	6.66
414	67261	6.68

[0096]

[0097] S8、累积产水量  $W(t)$  及累积产气量  $G(t)$  的校正，

[0098] 在地层的高温高压条件下，天然气在地层水中的溶解量会大大增加，水和天然气的体积随着温度压力也会有很大的变化，因此各个时刻地面累积产水量及累积产气量与地层条件下值差异较大，需进行校正，将地面条件下记录的值转化到地层条件下，

[0099]  $W'(t) = W(t)B_w, G'(t) = G(t) - W(t) \cdot GWR_w B_g,$

[0100] 其中： $W'(t)$  为校正后的累积产水量， $cm^3$ ； $G'(t)$  为校正后的累积产气量， $cm^3$ ；

[0101] 各个时刻地面累积产水量及累积产气量按照方案进行校正，将地面条件下记录的值转化到地层条件下，校正后的值见表 2。

[0102] 表 2 校正后的累积产水量及累积产气量

[0103]

累积时间 t, min	$W(t), cm^3$	$G(t), cm^3$
10	2.45	0.00
20	3.11	2.39
35	3.76	7.32
51	4.20	13.51
57	4.31	15.85
66	4.46	19.27
124	5.50	45.77
130	5.63	49.34
138	5.77	53.25
146	5.89	57.29

162	6.08	64.50
176	6.20	70.15
186	6.26	74.13
216	6.37	84.58
265	6.47	99.97
286	6.50	106.14
352	6.56	124.28
414	6.58	139.88

[0104]

[0105] S9、计算各时刻的水相相对渗透率  $K_{rw}$  和气相相对渗透率  $K_{rg}$  以及岩样出口端面含气饱和度  $S_{ge}$ ，

$$[0106] \quad f_w(S_g) = \frac{dV_w(t)}{dV(t)},$$

$$[0107] \quad K_{rw} = f_w(S_g) \frac{d[1/V(t)]}{d\{1/[I.V(t)]\}},$$

$$[0108] \quad K_{rg} = K_{rw} \frac{\mu_g}{\mu_w} \frac{1-f_w(S_g)}{f_w(S_g)},$$

$$[0109] \quad I = \frac{Q(t)}{Q_0} \frac{\Delta p_0}{\Delta p(t)},$$

$$[0110] \quad S_{ge} = V_w(t) - V(t) f_w(S_g),$$

$$[0111] \quad V_w(t) = \frac{W'(t)}{V_p},$$

$$[0112] \quad V(t) = \frac{W'(t) + G'(t)}{V_p},$$

$$[0113] \quad Q(t) = \frac{[W'(t) - W'(t-1)] + [G'(t) - G'(t-1)]}{\Delta t},$$

$$[0114] \quad \Delta p(t) = p_1(t) - p_2(t),$$

[0115] 其中：

[0116]  $f_w(S_g)$ ——含水率，小数，

[0117]  $V_w(t)$ ——无因次累积采水量，

[0118]  $V(t)$ ——无因次累积采水气量，

- [0119]  $K_{rw}$ ——水相相对渗透率, 小数,
- [0120]  $K_{rg}$ ——气相相对渗透率, 小数,
- [0121]  $I$ ——相对注入能力或流动能力比, 无因次,
- [0122]  $Q_0$ ——初始时刻岩样出口端面产水流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,
- [0123]  $Q(t)$ —— $t$  时刻岩样出口端面产水气流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,
- [0124]  $\Delta p_0$ ——初始驱动压差, MPa,
- [0125]  $\Delta p(t)$ —— $t$  时刻驱替压差, MPa,
- [0126]  $S_{ge}$ ——岩样出口端面含气饱和度, 小数,
- [0127]  $\mu_w$ ——地层水粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; 根据化学化工物性数据手册中地层水粘度与温度压力的关系表进行外推得到,
- [0128]  $\mu_g$ ——天然气粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; 根据天然气的视临界温度  $T_{pc}$  和视临界压力  $p_{pc}$  查卡尔科贝舍 Carr Kobayshi 和布鲁 Burrows 粘度图版查得。
- [0129] 根据经验公式和图版确定地层条件下气体粘度为  $\mu_g=0.0396\text{mPa} \cdot \text{s}$ , 将原始数据带入上面的计算公式中就得各时刻的水相相对渗透率  $K_{rw}$  和气相相对渗透率  $K_{rg}$  以及岩样出口端面含气饱和度  $S_{ge}$  如下表 3:
- [0130] 表 3 水相相对渗透率和气相相对渗透率以及岩样出口端面含气饱和度
- [0131]

累积时间 $t$ , min	$S_{ge}$ , 小数	$K_{rw}$ , 小数	$K_{rg}$ , 小数
10	0	1	0
20	0.1769	0.1993	0.1384
35	0.2276	0.1159	0.1688
51	0.2799	0.0737	0.2022
57	0.3103	0.0585	0.2290
66	0.3192	0.0547	0.2397
124	0.3288	0.0497	0.2446
130	0.3350	0.0500	0.2551
138	0.3480	0.0475	0.2615
146	0.3704	0.0466	0.2934
162	0.3933	0.0429	0.3128
176	0.4252	0.0376	0.3405

186	0.4669	0.0301	0.3842
216	0.4997	0.0230	0.4206
265	0.5330	0.0155	0.4580
286	0.5488	0.0120	0.4758
352	0.5649	0.0084	0.4877
414	0.5892	0.0034	0.5063

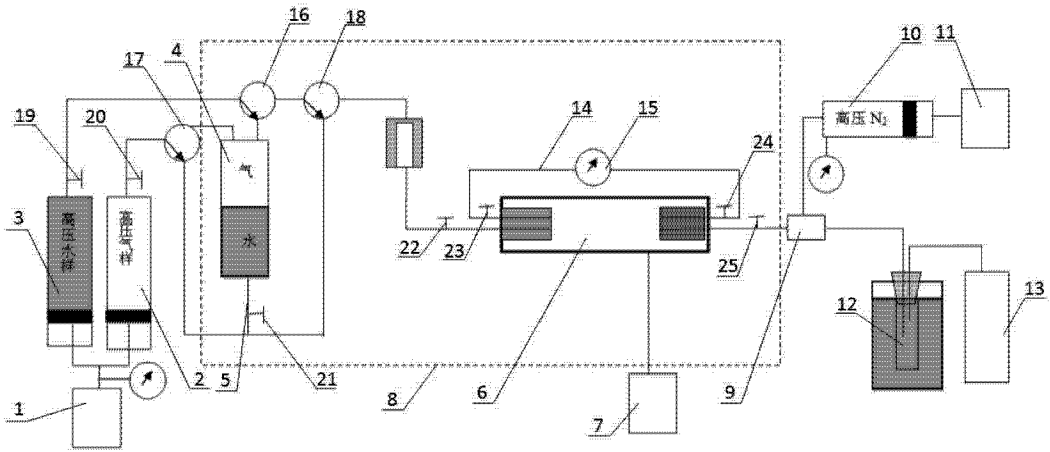


图 1

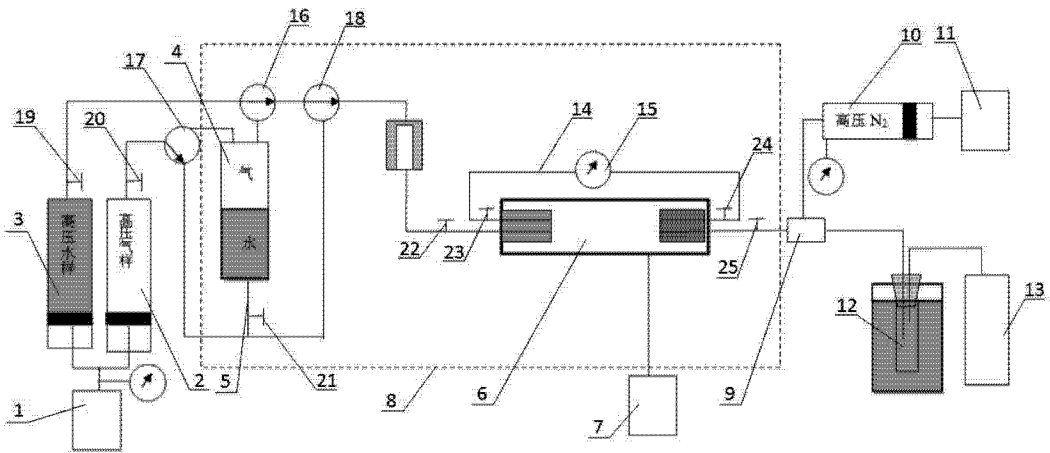


图 2

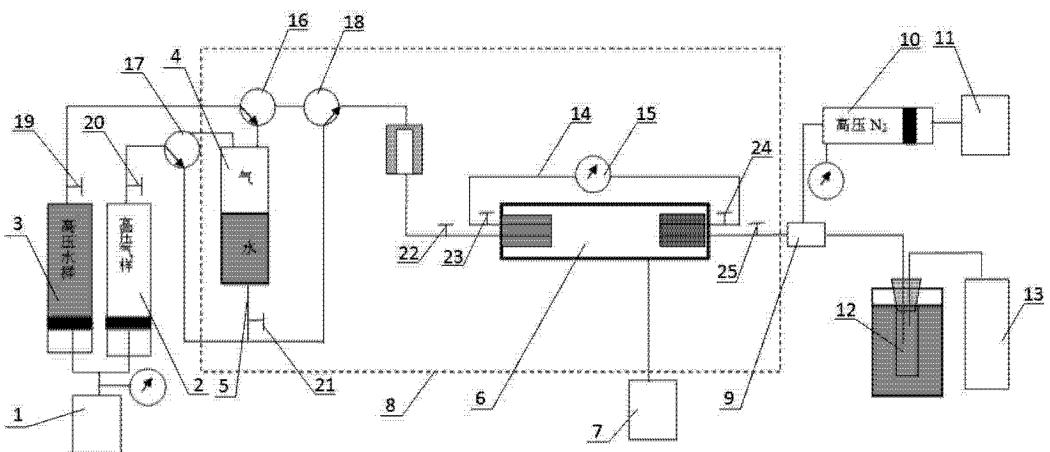


图 3

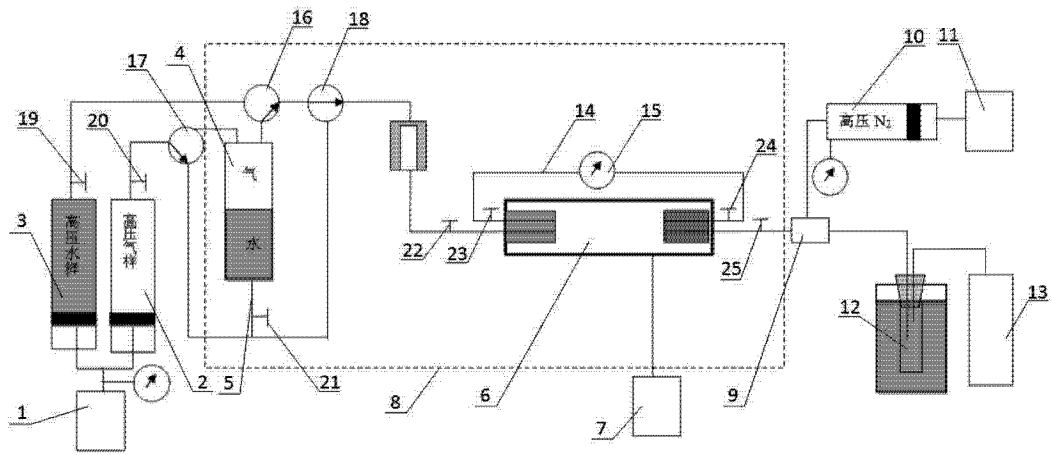


图 4