



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112858113 B

(45) 授权公告日 2022.07.22

(21) 申请号 202110022199.8

CN 201273903 Y, 2009.07.15

(22) 申请日 2021.01.08

CN 106442519 A, 2017.02.22

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 109827884 A, 2019.05.31

申请公布号 CN 112858113 A

US 2020333241 A1, 2020.10.22

US 2004011648 A1, 2004.01.22

(43) 申请公布日 2021.05.28

李蕾等. 页岩气低速渗流模拟实验系统设计.《实验技术与管理》.2020,第37卷(第11期),

(73) 专利权人 中国石油大学(华东)

地址 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号

牛保伦等.一种高仿真耐温耐压微观可视化模型及应用.《石油与天然气化工》.2018,第47卷(第4期),

(72) 发明人 李蕾 苏玉亮 郝永卯 张雪

王文东 付金刚 高小刚

宋睿等.岩石孔隙结构表征与流体输运可视化研究进展.《西南石油大学学报(自然科学版)》.2018,第40卷(第6期),

(74) 专利代理机构 青岛锦佳专利代理事务所

(普通合伙) 37283

Gyuryeong Park.et al.Microfluidic study for investigating migration and residual phenomena of supercritical CO2 in porous media.《Energy Procedia》.2017,

专利代理师 邵朋程

(续)

(51) Int.Cl.

G01N 13/04 (2006.01)

G01N 15/08 (2006.01)

G01M 10/00 (2006.01)

H04N 5/76 (2006.01)

审查员 杨柱超

(56) 对比文件

CN 111239132 A, 2020.06.05

CN 103592319 A, 2014.02.19

CN 107939362 A, 2018.04.20

权利要求书2页 说明书7页 附图1页

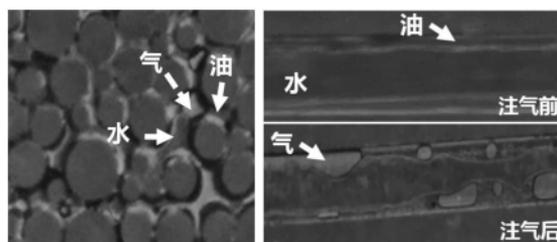
(54) 发明名称

一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法

(57) 摘要

本发明公开一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,包括以下步骤:将模拟实际储层条件下岩样的玻璃刻蚀模型安装在高压密封夹持器中,抽真空;向储层围压环腔中注入围压液,并通过围压跟踪泵控制围压;通过高温加热容器对储层围压环腔中的围压液加热升温;将玻璃刻蚀模型置于显微镜下;将原油和驱替流体介质分别装入加热恒温活塞容器中,将回压单元调节至地层模拟压力;通过高压注入泵和气体增压系统进行注水注气驱替实验。本发明可用于

模拟微纳米级孔隙结构中油水气分布状态与流体运移特征,定量表征高温高压水驱、气驱、化学驱微观剩余油启动机理,对于油田储层开发过程中的油水饱和度分布及大小的判断具有重要的指导意义。



CN 112858113 B

[接上页]

(56) 对比文件

Lei Li.et al.Experimental and Numerical Study on CO<sub>2</sub> Sweep Volume during CO<sub>2</sub> Huff-n-Puff Enhanced Oil Recovery Process in Shale Oil Reservoirs.

《Energy Fuels》.2019,

Yu-Liang Su.et al.A new model for predicting irreducible water saturation in tight gas reservoirs.《Petroleum Science 》.2020,

1. 一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于,采用微观可视化实验装置,该装置包括储层温压协调控制系统、驱替反应系统、数据采集及录像系统和辅助系统;

所述储层温压协调控制系统包括高压密封夹持器,在高压密封夹持器上设置有方便观察的蓝宝石视窗,在高压密封夹持器的内部形成有储层围压环腔;所述储层围压环腔通过流体加热输出管道与高温加热容器的壳层进口相连,高温加热容器的壳层出口通过流体加热输入管道与储层围压环腔相连接,在流体加热输入管道上设置有高压磁力循环泵;所述储层围压环腔与围压监测管道相连接,在围压监测管道上设置有围压跟踪泵;

所述驱替反应系统包括高压注入泵、加热恒温活塞容器、玻璃刻蚀模型和回压单元,玻璃刻蚀模型放置在高压密封夹持器的内部,在玻璃刻蚀模型的一端设置有注入端,且注入端与模型流体注入管道的一端相连接,模型流体注入管道的另一端与高温加热容器的管层出口相连接,高温加热容器的管层进口与流体输送主管道相连接,流体输送主管道与加热恒温活塞容器的出口端相连接,加热恒温活塞容器的进口端通过泵送管道连接高压注入泵;在玻璃刻蚀模型的另一端设置有采出端,采出端通过模型流体采出管道连接回压单元,在模型流体采出管道上设置有冷凝器;

所述数据采集及录像系统包括温度传感器、压力传感器、显微镜、数据采集处理系统和计算机,所述温度传感器分别设置在加热恒温活塞容器和高温加热容器上,压力传感器分别设置在流体输送主管道、围压监测管道和模型流体采出管道上;显微镜设置在正对蓝宝石视窗的位置处,数据采集处理系统设置在显微镜的目镜观察端;

所述辅助系统包括抽真空系统和气体增压系统,抽真空系统通过模型抽真空管道与流体输送主管道相连接,抽真空系统还通过环腔抽真空管道与储层围压环腔相连接;气体增压系统与流体输送主管道相连接;

所述温度传感器、压力传感器、数据采集处理系统、围压跟踪泵、气体增压系统和抽真空系统均与计算机相连接;

该实验方法包括以下步骤:

(1) 制作模拟实际储层条件下岩样的玻璃刻蚀模型;

(2) 将玻璃刻蚀模型安装在高压密封夹持器中,通过抽真空系统对储层围压环腔和玻璃刻蚀模型进行抽真空;

(3) 通过围压监测管道向储层围压环腔中注入围压液,并通过围压跟踪泵控制围压,使储层围压环腔中压力高于玻璃刻蚀模型内部压力;开启高压磁力循环泵,通过高温加热容器对储层围压环腔中的围压液加热升温,直至地层温度;

(4) 将玻璃刻蚀模型置于显微镜下,调节显微镜聚集位置及放大倍数,至高速摄像机能够采集到清晰的玻璃刻蚀模型内部的微纳米尺度通道图像;

(5) 将原油和驱替流体介质分别装入加热恒温活塞容器中,将回压单元调节至地层模拟压力;先通过高压注入泵和流体输送主管道向玻璃刻蚀模型中注入原油,使玻璃刻蚀模型饱和原油;

(6) 将流体输送主管道中的流体切换成驱替流体介质水,进行水驱油驱替实验,驱替过程中通过数据采集处理系统实时采集图像,当玻璃刻蚀模型的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替;

(7) 将流体输送主管道中的流体切换成高压气,通过气体增压系统进行高压气驱剩余油实验,控制驱替方式为连续气驱或者间歇气驱,驱替过程中通过数码监测摄像系统实时采集图像,当玻璃刻蚀模型的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替;

(8) 驱替完成后实验结束,通过温度传感器和压力传感器的记录数据以及玻璃刻蚀模型对应时刻的通道内流体流动特征进行分析,获得实验结果。

2. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:通过对岩样取芯扫描图像的预处理、分割、恢复及校正,明确能反映深层油藏储层特征的孔喉结构图,并通过微流控芯片制作方法,制得玻璃刻蚀模型。

3. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:通过围压跟踪泵控制围压,使储层围压环腔中压力高于玻璃刻蚀模型内部压力。

4. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:所述驱替流体介质在装入加热恒温活塞容器之前采用相同溶性染剂进行染色。

5. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:当玻璃刻蚀模型中的微纳米孔隙小于10微米时,在注入原油之前,先通过煤油饱和玻璃刻蚀模型。

6. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:所述高压注入泵对原油和驱替流体介质的注入速度均不高于0.02mL/min。

7. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:在围压监测管道上设置有第一阀门,在模型流体注入管道上设置有第二阀门,第二阀门为三通阀;当需要将原油与驱替流体介质进行切换时,或将驱替流体介质相互之间进行切换时,需先关闭第一阀门,然后通过第二阀门将流体输送主管道和模型流体注入管道中的流体排出。

8. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:所述高压气的气体组分为 $C_1$ - $C_4$ 任意比例混合的烃气。

9. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:实验结束后,将驱替介质换为石油醚冲刷清洗流体输送主管道、模型流体注入管道和玻璃刻蚀模型。

10. 根据权利要求1所述的一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,其特征在于:所述环腔抽真空管道上连接有第一放空管道,在第一放空管道上设置有第一放空阀;所述泵送管道上连接有第二放空管道,在第二放空管道上设置有第二放空阀;实验结束后通过第一放空阀将储层围压环腔中的流体排出,通过第二放空阀将加热恒温活塞容器中的流体排出。

## 一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微观驱替技术领域,具体地说是涉及一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法。

### 背景技术

[0002] 随着世界范围内更深更复杂地层的勘探开发活动越来越多,深层高温高压条件下的剩余油挖潜难度越来越大。尤其是油田进入高含水开发阶段产量递减期,开采挖潜对象由大片连通的剩余油,逐渐转向高度分散而局部又相对富集的区域,由于剩余油的微观赋存状态、分布规律认识不清,严重阻碍了下一步的剩余油挖潜。因此,探明高温高压条件下不同性质流体在微纳米尺度通道中的运移特征及剩余油富集规律对油藏生产开发尤为重要。

[0003] 现有的微观驱替实验方法是利用真实岩石打磨过后放入匹配的凹槽中,同时将岩石四周密封,由一侧注入流体,研究流体在岩石中的流动特性。但该技术有很大的局限性,一方面,岩石在使用过程中会受到磨损,岩石基本参数会随着实验过程发生改变,而且用过的岩石不易冲洗,重复性低;此外,常规微观驱替实验装置存在最主要的两个问题,一是由于复杂油藏埋藏较深,温度高压大(70MPa、150℃),常规实验装置难以复现真实储层的高温高压条件;另一方面,由于孔隙尺度较小,常规的实验装置也难以直观呈现不同性质流体在微纳米尺度通道内的运移规律,对剩余油分布规律进行定性定量的分析。

[0004] 因此,要全面深入了解不同性质流体在微通道中的流动规律,同时还要量化描述微观孔隙结构驱替过程中油水饱和度分布,这就需要实验方法在尽可能的还原复杂地层条件基础上,还对能否呈现孔喉内流体流动行为实况、实验操作的灵活性、实验数据的精确性等提出了新的要求。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的上述缺点,本发明提供一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法。

[0006] 本发明所采用的技术解决方案是:

[0007] 一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,采用微观可视化实验装置,该装置包括储层温压协调控制系统、驱替反应系统、数据采集及录像系统和辅助系统;

[0008] 所述储层温压协调控制系统包括高压密封夹持器,在高压密封夹持器上设置有方便观察的蓝宝石视窗,在高压密封夹持器的内部形成有储层围压环腔;所述储层围压环腔通过流体加热输出管道与高温加热容器的壳层进口相连,高温加热容器的壳层出口通过流体加热输入管道与储层围压环腔相连接,在流体加热输入管道上设置有高压磁力循环泵;所述储层围压环腔与围压监测管道相连接,在围压监测管道上设置有围压跟踪泵;

[0009] 所述驱替反应系统包括高压注入泵、加热恒温活塞容器、玻璃刻蚀模型和回压单元,玻璃刻蚀模型放置在高压密封夹持器的内部,在玻璃刻蚀模型的一端设置有注入端,且

注入端与模型流体注入管道的一端相连接,模型流体注入管道的另一端与高温加热容器的管层出口相连接,高温加热容器的管层进口与流体输送主管道相连接,流体输送主管道与加热恒温活塞容器的出口端相连接,加热恒温活塞容器的进口端通过泵送管道连接高压注入泵;在玻璃刻蚀模型的另一端设置有采出端,采出端通过模型流体采出管道连接回压单元,在模型流体采出管道上设置有冷凝器;

[0010] 所述数据采集及录像系统包括温度传感器、压力传感器、显微镜、数据采集处理系统和计算机,所述温度传感器分别设置在加热恒温活塞容器和高温加热容器上,压力传感器分别设置在流体输送主管道、围压监测管道和模型流体采出管道上;显微镜设置在正对蓝宝石视窗的位置处,数据采集处理系统设置在显微镜的目镜观察端;

[0011] 所述辅助系统包括抽真空系统和气体增压系统,抽真空系统通过模型抽真空管道与流体输送主管道相连接,抽真空系统还通过环腔抽真空管道与储层围压环腔相连通;气体增压系统与流体输送主管道相连接;

[0012] 所述温度传感器、压力传感器、数据采集处理系统、围压跟踪泵、气体增压系统和抽真空系统均与计算机相连接;

[0013] 该实验方法包括以下步骤:

[0014] (1) 制作模拟实际储层条件下岩样的玻璃刻蚀模型;

[0015] (2) 将玻璃刻蚀模型安装在高压密封夹持器中,通过抽真空系统对储层围压环腔和玻璃刻蚀模型进行抽真空;

[0016] (3) 通过围压监测管道向储层围压环腔中注入围压液,并通过围压跟踪泵控制围压,使储层围压环腔中压力高于玻璃刻蚀模型内部压力;开启高压磁力循环泵,通过高温加热容器对储层围压环腔中的围压液加热升温,直至地层温度;

[0017] (4) 将玻璃刻蚀模型置于显微镜下,调节显微镜聚集位置及放大倍数,至高速摄像机能够采集到清晰的玻璃刻蚀模型内部的微纳米尺度通道图像;

[0018] (5) 将原油和驱替流体介质分别装入加热恒温活塞容器中,将回压单元调节至地层模拟压力;先通过高压注入泵和流体输送主管道向玻璃刻蚀模型中注入原油,使玻璃刻蚀模型饱和原油;

[0019] (6) 将流体输送主管道中的流体切换成驱替流体介质水,进行水驱油驱替实验,驱替过程中通过数据采集处理系统实时采集图像,当玻璃刻蚀模型的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替;

[0020] (7) 将流体输送主管道中的流体切换成高压气,通过气体增压系统进行高压气驱剩余油实验,控制驱替方式为连续气驱或者间歇气驱,驱替过程中通过数码监测摄像系统实时采集图像,当玻璃刻蚀模型的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替;

[0021] (8) 驱替完成后实验结束,通过温度传感器和压力传感器的记录数据以及玻璃刻蚀模型对应时刻的通道内流体流动特征进行分析,获得实验结果。

[0022] 优选的,通过对岩样取芯扫描图像的预处理、分割、恢复及校正,明确能反映深层油藏储层特征的孔喉结构图,并通过微流控芯片制作方法,制得玻璃刻蚀模型。

[0023] 优选的,通过围压跟踪泵控制围压,使储层围压环腔中压力高于玻璃刻蚀模型内部压力2MPa。

[0024] 优选的,所述驱替流体介质在装入加热恒温活塞容器之前采用相同溶性染剂进行

染色。

[0025] 优选的,当玻璃刻蚀模型中的微纳米孔隙小于10微米时,在注入原油之前,先通过煤油饱和玻璃刻蚀模型。

[0026] 优选的,所述高压注入泵对原油和驱替流体介质的注入速度均不高于0.02mL/min。

[0027] 优选的,在围压监测管道上设置有第一阀门,在模型流体注入管道上设置有第二阀门,第二阀门为三通阀;当需要将原油与驱替流体介质进行切换时,或将驱替流体介质相互之间进行切换时,需先关闭第一阀门,然后通过第二阀门将流体输送主管道和模型流体注入管道中的流体排出。

[0028] 优选的,所述高压气的气体组分为C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>任意比例混合的烃气,也可采用N<sub>2</sub>或CO<sub>2</sub>。

[0029] 优选的,实验结束后,将驱替介质换为石油醚冲刷清洗流体输送主管道、模型流体注入管道和玻璃刻蚀模型。

[0030] 优选的,所述环腔抽真空管道上连接有第一放空管道,在第一放空管道上设置有第一放空阀;所述泵送管道上连接有第二放空管道,在第二放空管道上设置有第二放空阀;实验结束后通过第一放空阀将储层围压环腔中的流体排出,通过第二放空阀将加热恒温活塞容器中的流体排出。

[0031] 上述注气驱替与水驱油过程切换驱替介质的方式相同。

[0032] 上述驱替流体介质包括矿化度水和高压气体等。

[0033] 本发明的有益技术效果是:

[0034] 本发明采用可视化微纳米尺度孔喉模型即玻璃刻蚀模型来模拟实际岩石内部孔喉特征,通过储层温压协调控制系统及驱替反应系统,实现高温高压条件下流体在微纳米通道中的流动行为,结合数据采集及录像系统观察多孔介质内微观流体运移特征,真正实现了微观模型高压气驱实验过程中微观孔隙结构中的剩余油水饱和度的定量化,对于油田储层开发过程中的油气水饱和度分布及大小的判断具有重要的指导意义。

[0035] 本发明可用于模拟微纳米级孔隙结构中油水气分布状态与流体运移特征,定量表征高温高压水驱、气驱、化学驱微观剩余油启动机理。

[0036] 另外,本发明实验方法所采用的实验装置还具有以下两个关键设计点:

[0037] (1) 传统加热模式多采用加热盘管安装在加热套外壁上的间接加热方式,缺点是流体升温速度缓慢,热量散发快,温度提供不稳定等,同时也无法保证环腔与驱替介质温度的一致,可能会由于内外温度差造成流体介质的体积压缩或膨胀,无法有效控制驱替介质的注入速度和压力;本发明将传统加热模式改为釜内流体直接加热方式,采用的是高温加热容器中的加热管置入加热套中,与流经加热套的流体直接接触加热;高压磁力循环泵作为动力源,实现流体在储层围压环腔与高温加热容器之间循环流动,保证了围压环腔内流体的温度压力能够达到平衡;同时总驱替进口管线经过高压热交换容器预热进入玻璃刻蚀芯片,从而使得模型的整个加热系统同属一个加热体系,保证了进入玻璃刻蚀芯片的流体与围压环腔没有温度差,使得加热平衡时间更短、可视化模型受热更加均衡,提高了实验的准确性。

[0038] (2) 本发明采用围压跟踪泵持续监测循环管路中的压力状况,对循环管路中的流体进行补压与泄压;采用回压单元抬升整个驱替系统的压力,控制地层驱替介质的压力状

况,采用高精度回压阀可以准确保证驱替压力梯度,更加灵活地控制驱替过程中出口端压力;同时在出口处增设了冷凝器,可有效降低驱替介质的温度,保证高精度回压阀的使用寿命。通过回压单元等的设置可实现驱替压差梯度控制。

[0039] 本发明综合考虑了传统微观驱替实验装置的局限性,在利用微观可视化模型模拟地层岩石孔喉特征的基础上,构建了一种适用于高温高压流体驱替微观可视化实验研究的物理模拟装置及实验方法。本发明采用“围压环腔直接加热”的方式模拟储层实际温度,通过高压跟踪泵持续监测循环管路中的压力状况,对循环管路中的流体压力进行及时补充;将所需研究的一种或多种流体注入玻璃刻蚀芯片中,通过数字传感器测量,实现流体在微纳尺度通道中流动时温压数据的实时获取;通过显微镜观测,实现不同流体通过微观可视化模型的图像观察及采集;进而通过显微观察和定量分析相结合的方法,从本质上认识机理,实现不同流体流经微纳通道流动特征的研究。

## 附图说明

[0040] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步说明:

[0041] 图1为本发明微观可视化实验方法所采用实验装置的结构原理示意图;

[0042] 图2为本发明具体应用实例中高温高压下水驱转注气剩余油分布特征图。

[0043] 图中:1-高压注入泵;2-加热恒温活塞容器;3-气体增压系统;4-温度传感器;5-低量程压力传感器;6-中量程压力传感器;7-高量程压力传感器;8-抽真空系统;9-第一阀门;10-显微镜;11-数据采集处理系统;12-计算机;13-高温加热容器;14-高压磁力循环泵;15-储层围压环腔;16-高压密封夹持器;17-围压跟踪泵;18-回压单元;19-冷凝器;20-手动斜角调节支架;21-夹具;22-玻璃刻蚀模型;23-蓝宝石视窗;24-流体加热输出管道;25-流体加热输入管道;26-环腔抽真空管道;27-围压监测管道;28-模型流体注入管道;29-流体输送主管道;30-泵送管道;31-模型流体采出管道,32-模型抽真空管道,33-第二阀门,34-第三阀门,35-第四阀门,36-第五阀门,37-第六阀门,38-第七阀门,39-第一放空阀门,40-第二放空阀门。

## 具体实施方式

[0044] 一种深层油藏高温高压气驱油微观可视化实验方法,采用微观可视化实验装置,如图1所示,包括储层温压协调控制系统、驱替反应系统、数据采集及录像系统和辅助系统。所述储层温压协调控制系统主要功能是模拟真实储层环境中岩层所在的地层压力与温度情况。储层温压协调控制系统包括高压密封夹持器16,在高压密封夹持器16上设置有方便观察的蓝宝石视窗23,在高压密封夹持器16的内部形成有储层围压环腔15。所述储层围压环腔15通过流体加热输出管道24与高温加热容器13的壳层进口相连,高温加热容器13的壳层出口通过流体加热输入管道25与储层围压环腔15相连接,在流体加热输入管道25上设置有高压磁力循环泵14。所述储层围压环腔15与围压监测管道27相连接,在围压监测管道27上设置有围压跟踪泵17。围压跟踪泵17由围压泵和自动跟踪仪组成。

[0045] 所述驱替反应系统主要作为储层流体微观驱替场所,表征水驱、气驱、化学驱后剩余油渗流特征及分布情况。驱替反应系统包括高压注入泵1、加热恒温活塞容器2、玻璃刻蚀模型22和回压单元18,玻璃刻蚀模型22放置在高压密封夹持器16的内部,即处于储层围压

环腔15的空间中,玻璃刻蚀模型22的两端通过夹具21夹持固定。在玻璃刻蚀模型22的一端设置有注入端,且注入端与模型流体注入管道28的一端相连接,模型流体注入管道28的另一端与高温加热容器的管层出口相连接,高温加热容器的管层进口与流体输送主管道29相连接。流体输送主管道29与加热恒温活塞容器2的出口端相连接,加热恒温活塞容器2的进口端通过泵送管道30连接高压注入泵1。在玻璃刻蚀模型22的另一端设置有采出端,采出端通过模型流体采出管道31连接回压单元18,在模型流体采出管道上设置有冷凝器19。通过连接回压单元18和冷凝器19可控制模型两端驱替压力梯度、自动记录并收集产出流体。

[0046] 所述数据采集及录像系统主要功能为实时记录驱替流体流动状态、采集储层温压协调控制系统和驱替反应系统的温度压力数据。数据采集及录像系统包括温度传感器4、压力传感器、显微镜10、数据采集处理系统11和计算机12,所述温度传感器4分别设置在加热恒温活塞容器2和高温加热容器13上,压力传感器分别设置在流体输送主管道、围压监测管道和模型流体采出管道上。显微镜10设置在正对蓝宝石视窗的位置处,处于玻璃模型刻蚀片正上方。显微镜目镜装有数据采集处理系统11。

[0047] 所述辅助系统包括抽真空系统8和气体增压系统3,抽真空系统8通过模型抽真空管道32与流体输送主管道29相连接,抽真空系统还通过环腔抽真空管道26与储层围压环腔相连通。抽真空系统8用于对驱替反应系统进行抽真空,具体地,抽真空系统通过环腔抽真空管道对储层围压环腔15抽真空,抽真空系统通过模型抽真空管道32对模型的内部孔隙进行抽真空。气体增压系统3与流体输送主管道29相连接。气体增压系统包括空气压缩机、气体增压泵、气体单向阀和微量阀。

[0048] 所述温度传感器、压力传感器、数据采集处理系统11、围压跟踪泵17、气体增压系统3和抽真空系统8均与计算机12相连接。通过数据采集及录像系统可获取通道中流体流动的图像及视频以及实时温度、压力数据等,可实现操作、控制、采集自动一体化,达到对实验进程和效果实时动态检测的目的。

[0049] 上述加热恒温活塞容器2设置多个,且呈并联布置,分别用于存放模拟地层温度条件下的地层油、水、聚合物等多重介质流体。

[0050] 该实验方法包括以下步骤:

[0051] (1) 通过对取芯扫描图像的预处理、分割、恢复及校正,明确能反映深层油藏的孔喉结构图,并通过相关微流控芯片制作方法,制得模拟实际储层条件下岩样的玻璃刻蚀模型22。

[0052] (2) 将玻璃刻蚀模型22安装在高压密封夹持器16中,通过抽真空系统8分别对储层围压环腔15和玻璃刻蚀模型22进行抽真空,抽真空时间为2h,以确保玻璃刻蚀模型的微纳米尺度通道中没有空气存在。

[0053] (3) 通过围压监测管道向储层围压环腔中注入围压液,并通过围压跟踪泵17控制围压,使储层围压环腔中压力始终高于玻璃刻蚀模型内部压力2MPa。开启高压磁力循环泵14,通过高温加热容器13对储层围压环腔中的围压液加热升温,直至地层温度。

[0054] (4) 将玻璃刻蚀模型置于显微镜10下,调节显微镜10聚集位置及放大倍数,至高速摄像机11能够采集到清晰的玻璃刻蚀模型内部的微纳米尺度通道图像。

[0055] (5) 将原油和驱替流体介质分别装入加热恒温活塞容器2中,将回压单元18调节至地层模拟压力。先通过高压注入泵1和流体输送主管道29向玻璃刻蚀模型中注入原油,使玻

璃刻蚀模型饱和原油。

[0056] (6) 将流体输送主管道29中的流体切换成驱替流体介质水,进行水驱油驱替实验,驱替过程中通过数据采集处理系统11实时采集图像,当玻璃刻蚀模型的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替。

[0057] (7) 将流体输送主管道29中的流体切换成高压气,通过气体增压系统3进行高压气驱剩余油实验,控制驱替方式为连续气驱或者间歇气驱,驱替过程中通过数码监测摄像系统11实时采集图像,当玻璃刻蚀模型22的孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替。

[0058] (8) 驱替完成后实验结束,通过温度传感器和压力传感器的记录数据以及玻璃刻蚀模型对应时刻的通道内流体流动特征进行分析,获得实验结果。

[0059] 作为对本发明的进一步设计,所述驱替流体介质在装入加热恒温活塞容器之前采用相同溶性染剂进行染色。采用染色剂进行染色的目的是方便观测识别,且采用相同溶性染剂,即该染剂仅与所染色的液体介质相容,而与另外待驱替的介质不相溶,防止不同液体之间串色。

[0060] 进一步的,当玻璃刻蚀模型中的微纳米孔隙太小时,如小于10微米时,可先通过煤油饱和玻璃刻蚀模型,以方便后期原油的顺利注入。

[0061] 上述高压注入泵对原油和驱替流体介质的注入速度均不高于0.02mL/min。

[0062] 上述高压气的气体组分为 $C_1-C_4$ 任意比例混合的烃气。上述注气驱替与水驱油过程切换驱替介质的方式相同。上述驱替流体介质包括矿化度水和高压气体等。

[0063] 在围压监测管道27、模型流体注入管道28、流体输送主管道29和泵送管道30等上均设置有阀门。具体地,环腔抽真空管道上连接有第一放空管道,在第一放空管道上设置有第一放空阀门39,通过第一放空阀门39可在实验完成后将储层围压环腔15中的围压液放空。所述泵送管道上连接有第二放空管道,在第二放空管道上设置有第二放空阀40,通过第二放空阀40可在实验完成后将加热恒温活塞容器中的流体介质放空。

[0064] 在围压监测管道上设置有第一阀门9,在模型流体注入管道上设置有第二阀门33,在连入流体输送主管道的低量程压力传感器管道上设置有第三阀门34,在连入流体输送主管道的中量程压力传感器管道上设置有第四阀门35。在泵送管道连接加热恒温活塞容器进口端的支管路上分别设置有第五阀门36、第六阀门37和第七阀门38。在加热恒温活塞容器出口端也均设置有控制阀门。通过相关位置阀门的开启闭合可控制驱替流体介质的切换。如当需要将原油与驱替流体介质进行切换时,或将驱替流体介质相互之间进行切换时,需先关闭第一阀门9,保证围压值不发生变化,然后通过第二阀门33将流体输送主管道和模型流体注入管道中的流体排出。

[0065] 上述控制阀门也可进一步与计算机相连接。

[0066] 进一步的,上述方法还包括通过气体增压系统3进行注气驱替的步骤,注气驱替与步骤(6)水驱油过程切换驱替介质的方式相同。

[0067] 更进一步的,实验结束后,将驱替介质换为石油醚冲刷清洗流体输送主管道29、模型流体注入管道28和玻璃刻蚀模型22。

[0068] 上述压力传感器在流体输送主管道上布置多个,分别为低量程压力传感器5、中量程压力传感器6和高量程压力传感器7,用于监测不同注入条件下的模拟驱替压力值。布置

在围压监测循环管道和模型流体采出管道上的压力传感器均为高量程压力传感器。

[0069] 上述回压单元包括高精度回压阀、缓冲罐和回压泵。高精度回压阀的一端连接玻璃刻蚀模型,高精度回压阀的另一端通过管道与缓冲罐相连,所述回压泵通过管道连接在缓冲罐上。高精度回压阀是采用薄片式结构,具有调节灵敏度高、耐压高(最大压力70MPa)、控制精度高、重量轻等优点;缓冲罐在实验驱替过程中起稳定压力、收集产出流体的作用,耐压70MPa。

[0070] 进一步的,在高压密封夹持器的底部设置有手动斜角调节支架20,该支架为带有手动斜角调节功能的专用支架,调节范围 $0-45^{\circ}$ ,可实现对地层倾斜角度的物理实验模拟,提高整个实验装置的可操作性和灵活性。

[0071] 上述高温加热容器13包括密封壳体,在密封壳体内可布置有加热装置等,以对壳体内部空间即壳层中的流体进行加热。在密封壳体的内部还穿过有换热管,换热管的管程两端分别连接模型流体注入管道28和流体输送主管道29,通过换热管的流体可与壳层中的流体进行热交换。

[0072] 采用本发明方法开展了高温高压(70MPa、 $150^{\circ}\text{C}$ )条件下水驱转注气微观可视化实验,模拟微纳米尺度下(最小孔喉直径为 $20\mu\text{m}$ )剩余油启动机理与富集规律,结果如图2所示。

[0073] 本发明采用可视化微纳米尺度孔喉模型即玻璃刻蚀模型来模拟实际岩石内部孔喉特征,通过储层温压协调控制系统及驱替反应系统,实现高温高压条件下流体在微纳米通道中的流动行为,结合数据采集及录像系统观察多孔介质内微观流体运移特征,真正实现了微观模型驱替实验过程中微观孔隙结构中的剩余油水饱和度的定量化,对于油田储层开发过程中的油水饱和度分布及大小的判断具有重要的指导意义。

[0074] 上述方式中未述及的部分采取或借鉴已有技术即可实现。

[0075] 需要说明的是,在本说明书的教导下,本领域技术人员所作出的任何等同替代方式,或明显变形方式,均应在本发明的保护范围之内。

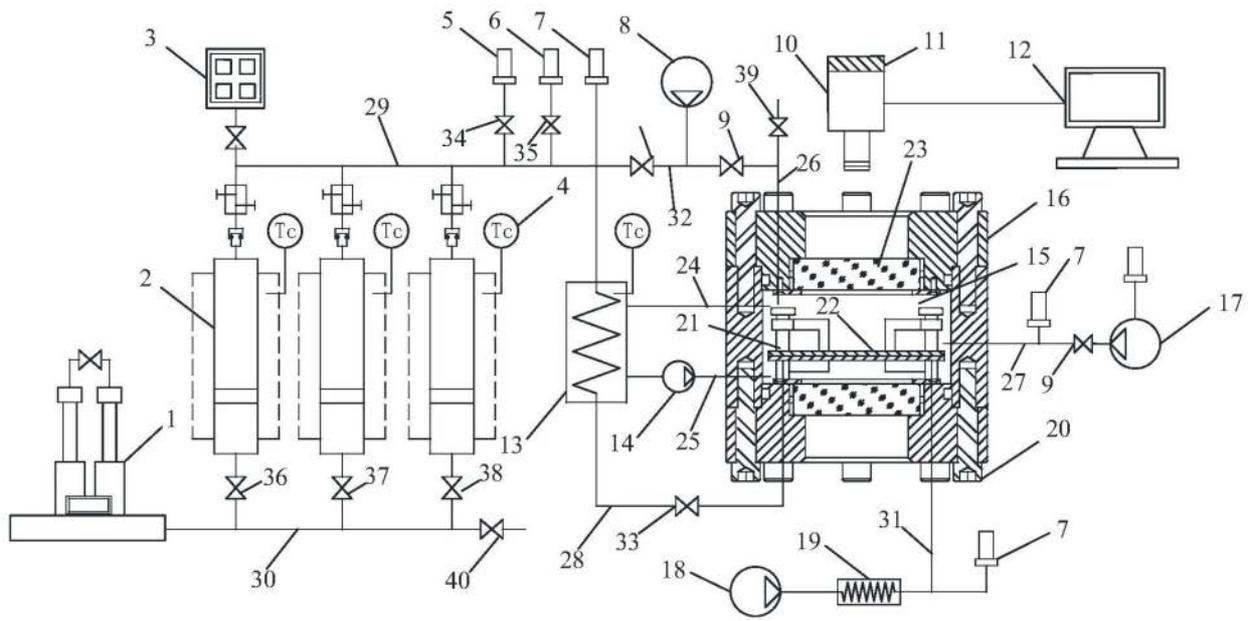


图1

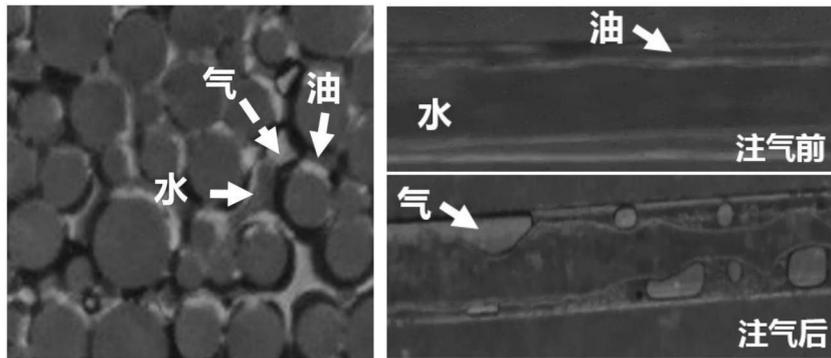


图2