



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113075112 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 02

(21) 申请号 202110463648.2

(22) 申请日 2021.04.26

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113075112 A

(43) 申请公布日 2021.07.06

(73) 专利权人 东北大学

地址 110819 辽宁省沈阳市和平区文化路3号巷11号

(72) 发明人 陈天宇 付彦吉 李福栋 孙子涵
郑旭 王文芳 郝岩屿 宋海国

(74) 专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限公司 21109

专利代理师 梁焱

(51) Int. Cl.

G01N 15/08 (2006.01)

G01N 22/00 (2006.01)

G01N 3/12 (2006.01)

G01N 33/24 (2006.01)

G09B 23/40 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 214749640 U, 2021.11.16

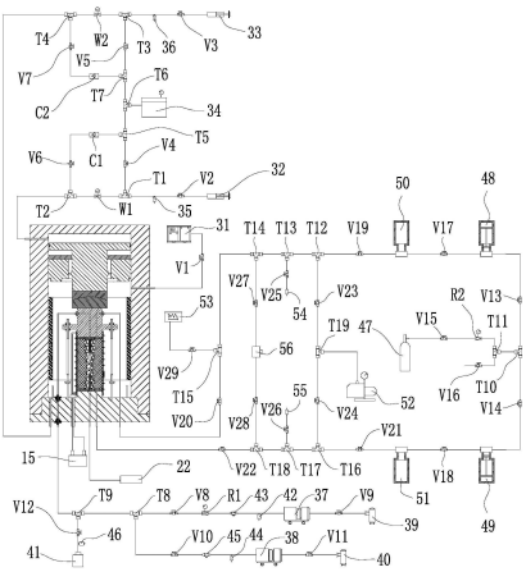
审查员 曹萌媛

(54) 发明名称

一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法

(57) 摘要

一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法,装置包括三轴压力室单元、围压与轴压控制单元、水力压裂控制单元、微波致裂控制单元及渗透控制单元。方法为:利用标准钢样替代页岩试样进行体积标定,通过三轴压力室单元、围压与轴压控制单元及渗透控制单元配合,完成上渗透参考体积和下渗透参考体积的测量;拆除标准钢样,将页岩试样安装到三轴压力室单元内并完成装置连接;通过围压与轴压控制单元以及三轴压力室单元内的加热器完成地应力和地层温度环境的模拟;通过水力压裂控制单元完成页岩试样的水力压裂;通过微波致裂控制单元完成页岩试样的微波致裂;通过渗透控制单元完成页岩试样的渗透,最后计算得到页岩试样的渗透率。



1. 一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于:三轴压力室单元、围压与轴压控制单元、水力压裂控制单元、微波致裂控制单元及渗透控制单元;所述三轴压力室单元包括压力室壳体、下部承压台、自平衡活塞、球面压头、上压头、轴压加载腔、围压加载腔;所述压力室壳体采用底端开口的圆柱筒型结构,压力室壳体竖直设置,所述下部承压台与压力室壳体的底端开口密封连接配合;所述自平衡活塞位于压力室壳体内部顶端,自平衡活塞与压力室壳体顶部壁板之间的腔室为轴压加载腔,自平衡活塞的活塞杆朝下延伸至压力室壳体内部的围压加载腔;在所述下部承压台上表面中心设有试样承载凸台,圆柱型的页岩试样竖直放置在试样承载凸台上,在页岩试样与试样承载凸台之间设置有下多孔垫片,所述上压头竖直放置在页岩试样顶端,在页岩试样与上压头之间设置有上多孔垫片,所述球面压头设置在上压头与自平衡活塞的活塞杆之间;在所述页岩试样外表面包覆有金属屏蔽网,在金属屏蔽网外部包覆有热缩套管,且热缩套管的上端延伸包覆在上压头上,热缩套管的下端延伸包覆在试样承载凸台上;在所述热缩套管外周侧套装有螺旋冷却盘管,在所述压力室壳体外部设置有高低温循环一体机,所述螺旋冷却盘管通过冷却循环管路与高低温循环一体机相连通;在所述上压头与下部承压台之间连接有压弹式轴向位移传感器且分立两侧;在所述围压加载腔所处的压力室壳体内表面设置有线圈式加热器;在所述热缩套管外表面贴装有第一温度传感器,在所述下部承压台上表面安装有第二温度传感器和第三温度传感器;所述微波致裂控制单元包括微波发射探头和微波发生器;在所述页岩试样下半段的内部中心开设有微波致裂孔,在页岩试样上半段的内部中心开设有水力压裂孔;所述微波发射探头位于微波致裂孔内,所述微波发生器位于压力室壳体外部,微波发生器与微波发射探头通过微波传输线相连;在所述压力室壳体内部设有水力压裂管,水力压裂管一端通过上压头内开设的通道密封插装在水力压裂孔内,水力压裂管另一端通过下部承压台内开设的通道延伸至压力室壳体外部并接入水力压裂控制单元;在所述压力室壳体内部设有上渗流通气管,上渗流通气管一端通过上压头内开设的通道与页岩试样上表面密封连通,上渗流通气管另一端通过下部承压台内开设的通道延伸至压力室壳体外部并接入渗透控制单元;在所述下部承压台内设有下渗流通气管,下渗流通气管一端与页岩试样下表面密封连通,下渗流通气管另一端延伸至压力室壳体外部并接入渗透控制单元;在所述轴压加载腔所在处的压力室壳体侧向壁板上开设有轴压加载孔,轴压加载腔通过轴压加载孔接入围压与轴压控制单元;在所述下部承压台内开设有围压加载孔,围压加载腔通过围压加载孔接入围压与轴压控制单元;在所述围压加载腔所在处的压力室壳体侧向壁板上开设有压缩空气注入孔,在压力室壳体外部设置有空压机,所述围压加载腔通过压缩空气注入孔与空压机相连,在压缩空气注入孔与空压机之间的管路上设置有第一截止阀。

2. 根据权利要求1所述的一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于:所述围压与轴压控制单元包括轴压泵、围压泵及控油油箱;所述轴压泵通过管路与轴压加载孔相连通,在轴压泵与轴压加载孔之间的管路上依次设置有第二截止阀、第一压力传感器、第一三通、第一稳压阀及第二三通;所述围压泵通过管路与围压加载孔相连通,在围压泵与围压加载孔之间的管路上依次设置有第三截止阀、第二压力传感器、第三三通、第二稳压阀及第四三通;所述第一三通与第三三通通过管路相连通,在第一三通与第三三通之间的管路上依次设置有第四截止阀、第五三通、第六三通、第七三通及第五截止阀;所述控油油箱与第六三通相连通;所述第二三通与第五三通通过管路相连通,在第二三通与第

五三通之间的管路上依次设置有第六截止阀和第一单向阀;所述第四三通与第七三通通过管路相连通,在第四三通与第七三通之间的管路上依次设置有第七截止阀和第二单向阀。

3. 根据权利要求2所述的一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于:所述水力压裂控制单元包括第一压裂泵、第二压裂泵、第一储液罐、第二储液罐及废液回收罐;所述第一压裂泵通过管路与水力压裂管相连通,在第一压裂泵与水力压裂管之间的管路上依次设置有第三压力传感器、第一流量传感器、第一减压阀、第八截止阀、第八三通及第九三通;所述第一储液罐通过管路与第一压裂泵相连通,在第一储液罐与第一压裂泵之间的管路上设置有第九截止阀;所述第二压裂泵通过管路与第八三通相连通,在第二压裂泵与第八三通之间的管路上依次设置有第四压力传感器、第二流量传感器及第十截止阀;所述第二储液罐通过管路与第二压裂泵相连通,在第二储液罐与第二压裂泵之间的管路上设置有第十一截止阀;所述废液回收罐通过管路与第九三通相连通,在废液回收罐与第九三通之间的管路上依次设置有第五压力传感器和第十二截止阀。

4. 根据权利要求3所述的一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于:所述渗透控制单元包括高压气瓶、第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器、第二容器、真空泵及气象色谱仪;所述高压气瓶分两路输出,第一路依次通过第一高压注入泵及第一容器与上渗流通气管相连通,第二路依次通过第二高压注入泵及第二容器与下渗流通气管相连通;在所述第一高压注入泵与第二高压注入泵之间的管路上依次设置有第十三截止阀、第十三三通及第十四截止阀;所述高压气瓶与第十三三通相连通,在高压气瓶与第十三三通之间的管路上依次设置有第十五截止阀、第二减压阀及第十一三通,大气与第十一三通相连通,在大气与第十一三通之间的管路上设置有第十六截止阀;在所述第一高压注入泵与第一容器之间的管路上设置有第十七截止阀;在所述第二高压注入泵与第二容器之间的管路上设置有第十八截止阀;在所述第一容器与上渗流通气管之间的管路上依次设置有第十九截止阀、第十二三通、第十三三通、第十四三通、第十五三通及第二十截止阀;在所述第二容器与下渗流通气管之间的管路上依次设置有第二十一截止阀、第十六三通、第十七三通、第十八三通及第二十二截止阀;所述第十二三通与第十六三通通过管路相连通,在第十二三通与第十六三通之间的管路上依次设置有第二十三截止阀、第十九三通及第二十四截止阀;所述真空泵与第十九三通相连通;所述第十三三通通过管路连接有第六压力传感器,在第六压力传感器与第十三三通之间的管路上设置有第二十五截止阀;所述第十七三通通过管路连接有第七压力传感器,在第七压力传感器与第十七三通之间的管路上设置有第二十六截止阀;所述第十四三通与第十八三通通过管路相连通,在第十四三通与第十八三通之间的管路上依次设置有第二十七截止阀、压差传感器及第二十八截止阀;所述气象色谱仪与第十五三通相连通,在气象色谱仪与第十五三通之间的管路上设置有第二十九截止阀。

5. 根据权利要求4所述的一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于:在所述压力室壳体外部设置有信息采集器和计算机,所述第一温度传感器、第二温度传感器、第三温度传感器、第一压力传感器、第二压力传感器、第三压力传感器、第四压力传感器、第五压力传感器、第六压力传感器、第七压力传感器、第一流量传感器、第二流量传感器、压差传感器及压弹式轴向位移传感器的信号输出端与信息采集器进行电连接,信息采集器的信号输出端与计算机进行电连接。

6. 一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验方法,采用了权利要求4所述的水力

压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,其特征在于包括如下步骤:

步骤一:标定体积

步骤①:对渗透控制单元内的所有管路进行检漏,首先关闭第二十截止阀和第二十二截止阀,同时使渗透控制单元内的其他所有截止阀处于开启状态,然后打开高压气瓶向管路内充气增压,待充气增压结束后关闭高压气瓶,之后将所有开启的截止阀调整到关闭状态,最后利用检漏液逐一对所有管路接口进行检漏,全部检漏合格后方可执行后续步骤;

步骤②:准备一块标准钢样,标准钢样与页岩试样尺寸完全相同,且标准钢样上无需加工微波致裂孔和水力压裂孔,并在标准钢样上、下端分别放置上多孔垫片和下多孔垫片,再将其装夹到上压头与试样承载凸台之间;将标准钢样中心对准上压头及试样承载凸台中心,外部套上热缩套管进行隔绝密封,将第一温度传感器紧贴热缩套管表面设置;与页岩试样装夹时的区别在于,无需安装金属屏蔽网、微波发射探头及水力压裂管;

步骤③:打开第二截止阀、第四截止阀,将轴压加载腔和轴压泵充满油,充满油后关闭第四截止阀,打开第三截止阀、第五截止阀,将围压加载腔和围压泵充满油,充满油后关闭第五截止阀;设置围压泵压力为 σ_{c1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第二稳压阀的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔保持在指定压力值 σ_{c1} ,为标准钢样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵压力 σ_{d1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第一稳压阀的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔保持在指定压力值 σ_{d1} ,为标准钢样提供轴压 σ_{d1} ;

步骤④:将第十三截止阀、第十四截止阀、第十五截止阀、第十七截止阀、第十八截止阀、第十九截止阀、第二十截止阀、第二十一截止阀、第二十二截止阀、第二十三截止阀、第二十四截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵,将下多孔垫片、上多孔垫片、上渗流通气管、下渗流通气管以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,之后关闭第二十三截止阀和第二十四截止阀,最后关停真空泵;

步骤⑤:先关闭第十七截止阀和第十八截止阀,然后调节第二减压阀至设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶,在设定压力 P_1 下向第一高压注入泵和第二高压注入泵内充入渗透测试气体,直到第一高压注入泵和第二高压注入泵内的气体压力也达到设定压力 P_1 且保持恒定,然后关闭第十三截止阀和第十四截止阀,最后关闭高压气瓶;

步骤⑥:启动线圈式加热器,用以加热标准钢样,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程中整个室内温度保持不变;然后记录下此时第一高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_1 ;同时记录下此时第二高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_2 ;

步骤⑦:分别确定上渗透参考体积和下渗透参考体积;当确定上渗透参考体积时,先关闭第二十截止阀,然后打开第十七截止阀,通过第一高压注入泵向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直到第一高压注入泵内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第一高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{12} ;最后按照公式 $V_u = V_1 - V_{12}$ 计算出上渗透参考体积,式中的 V_u 即为上渗透参考体积;当确定下渗透参考体积时,先关闭第二十二截止阀,然后打开第十八截止阀,通过第二高压注入泵向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直

到第二高压注入泵内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第二高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{22} ;最后按照公式 $V_d = V_2 - V_{22}$ 计算出下渗透参考体积,式中的 V_d 即为下渗透参考体积;

步骤二:安装试样

步骤①:将标准钢样拆除,然后准备一块页岩试样,并在页岩试样上、下端面中心处分别钻削加工出水力压裂孔和微波致裂孔;

步骤②:将微波发射探头安装到试样承载凸台上,之后将微波发射探头接入微波发生器;同时,将水力压裂管安装到上压头上,之后将水力压裂管接入水力压裂控制单元,水力压裂管与上压头和下部承压台保证密封连接;

步骤③:先将下多孔垫片放置到试样承载凸台上,然后将页岩试样放置到下多孔垫片上,使微波发射探头插入微波致裂孔内,再将上多孔垫片放置到页岩试样上,之后用金属屏蔽网将页岩试样、上多孔垫片及下多孔垫片包裹密封;

步骤④:在页岩试样外部依次套装上热缩套管和螺旋冷却盘管,之后将螺旋冷却盘管接入高低温循环一体机,然后将上压头放置到上多孔垫片,使水力压裂管插入水力压裂孔内,水力压裂管底部距钻孔底部的距离为1/3的钻孔深度,且在水力压裂管插入之前,需要在水力压裂管管口处安装上密封胶圈,在密封胶圈上方缠绕密封胶带,保证水力压裂管与水力压裂孔之间的密封性,然后在水力压裂管中上部用注射器分层注入耐高温密封胶,直到注满为止,最后利用热风枪加热热缩套管直到其紧密包裹在页岩试样上;

步骤⑤:将压弹式轴向位移传感器安装到上压头与下部承压台之间,之后将第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器安装到位,最后通过千斤顶抬升下部承压台并与压力室壳体扣合在一起,再通过螺栓将下部承压台固定在压力室壳体上,直至完成压力室壳体与下部承压台的封装;

步骤三:模拟地应力和地层温度环境

步骤①:首先打开围压与轴压控制单元的第四截止阀、第五截止阀、第一稳压阀和第二稳压阀,然后启动控油油箱向轴压加载腔和围压加载腔内充入液压油,直到轴压加载腔和围压加载腔内的液压油充满,之后关闭第一稳压阀和第二稳压阀;

步骤②:首先打开第二截止阀和第三截止阀,然后通过控油油箱向轴压泵和围压泵内充入液压油,直到轴压泵和围压泵内的充油量达到90%后充油结束,之后关闭第二截止阀和第三截止阀,最后关闭控油油箱;

步骤③:启动线圈式加热器,用以加热页岩试样,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程整个室内温度保持不变,此时完成地层温度环境的模拟;

步骤④:设置围压泵压力为 σ_{c1} ,打开第三截止阀,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第二稳压阀的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔保持在指定压力值 σ_{c1} ,为页岩试样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵压力 σ_{d1} ,打开第二截止阀,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第一稳压阀的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔保持在指定压力值 σ_{d1} ,为页岩试样提供轴压 σ_{d1} ;此时完成地应力的模拟;

步骤四:水力压裂

步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,采用定压压裂方式或定流量压裂方式;当采用定压压裂方式时,首先打开第八截止阀和第九截止阀,压裂液由第一储液罐流出,先经第一压裂泵增压,再依次经第一减压阀和水力压裂管后以设定压力流入页岩试样的水力压裂孔内,直至完成页岩试样的水力压裂;当采用定流量压裂方式时,首先打开第十截止阀和第十一截止阀,压裂液由第二储液罐流出,先经第二压裂泵增压,再直接通过水力压裂管后以设定流量流入页岩试样的水力压裂孔内,直至完成页岩试样的水力压裂;

步骤②:当页岩试样完成水力压裂后,打开第十二截止阀,将压裂液卸压回收到废液回收罐内;

步骤五:微波致裂

步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,调节第一单向阀数值为 σ_{d1} ,调节第二单向阀数值为 σ_{c1} ,首先打开围压与轴压控制单元的第六截止阀和第七截止阀,同时打开渗透控制单元的第二十截止阀和第二十五截止阀,然后启动微波发生器,进而通过微波发射探头向页岩试样输入微波辐射,进而使页岩试样内部产生高温以实现致裂作用,此时页岩试样会因微波作用产生气体,而气体的产生会导致压力变化,而该压力变化则通过第六压力传感器进行实时监测,同时页岩试样温度则由第一温度传感器进行实时监测,如果温度超过设定值,则立即启动高低温循环一体机,进而通过螺旋冷却盘管对页岩试样进行降温,防止温度过高造成热缩套管变形和油温过高损坏元件;在对页岩试样进行微波致裂过程中,因受热造成的油压升高,会触发第一单向阀和第二单向阀开启,使多出的液压油流回到油箱内部,从而维持围压和轴压的恒定;

步骤②:当微波致裂达到设定时间后,关闭微波发生器,之后当第一温度传感器所监测的温度值低于地层温度环境模拟下的温度设定值后,关闭高低温循环一体机;当第六压力传感器所监测的压力值不再变化时,说明页岩试样内不再产生气体;之后关闭第六截止阀和第七截止阀,最后再次启动线圈式加热器对页岩试样进行加热,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均重新达到设定值;

步骤③:打开第二十九截止阀,将管路中的气体导入气象色谱仪中,之后立即关闭第二十九截止阀,通过气象色谱仪对管路中的气体成分和含量进行分析;最后将装置内的所有截止阀均调整为关闭状态;

步骤六:试样渗透率测量

步骤①:将第十三截止阀、第十四截止阀、第十五截止阀、第十七截止阀、第十八截止阀、第十九截止阀、第二十截止阀、第二十一截止阀、第二十二截止阀、第二十三截止阀、第二十四截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵,将下多孔垫片、上多孔垫片、上渗流通气管、下渗流通气管以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,打开第二十五截止阀、第二十六截止阀、第二十七截止阀、第二十八截止阀,抽真空15秒,之后关闭第二十三截止阀和第二十四截止阀,最后关停真空泵;

步骤②:先关闭第二十截止阀和第二十二截止阀,然后调节第二减压阀使压力达到设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶,在设定压力 P_1 下将第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器内充满渗透测试气体,之后关闭第十三截止阀、第十四截止阀和第十五截止

阀,运行第一高压注入泵和第二高压注入泵,使渗透控制单元内的压力达到设定压力 P_1 且保持恒定;

步骤③:打开第二十截止阀和第二十二截止阀,通过第一高压注入泵、第二高压注入泵同步以设定压力 P_1 向页岩试样内注入渗透测试气体,直到压差传感器的读数为零时结束,之后关闭第二十截止阀和第二十二截止阀;

步骤④:先关闭第十七截止阀,使上渗透控制单元变为定容状态,然后升高第二高压注入泵至设定压力 P_2 ,待压力稳定后,再关闭第十八截止阀,使下渗透控制单元变为定容状态,并记录下此时第七压力传感的读数,并将该压力读数记为 P_0 ,同时将此刻记为 T_0 ;

步骤⑤:打开第二十截止阀和第二十二截止阀,渗透测试气体开始进入页岩试样内进行渗透,直到压差传感器的读数稳定后,记录下此时第七压力传感器的读数,并将该压力读数记为 P_n ,同时将此刻记为 T_n ;最后按照如下公式计算页岩试样的渗透率;

$$K = -\frac{\ln P_n - \ln P_0}{T_n - T_0} \cdot \frac{C\mu L}{A \left(\frac{1}{V_d} + \frac{1}{V_u} \right)}$$

式中, K 为渗透率, P_n 为渗透结束后下渗端压力, P_0 为渗透开始前下渗端压力, T_n 为渗透结束时刻, T_0 为渗透起始时刻, C 为渗透测试气体压缩系数, μ 为渗透测试气体粘度, L 为页岩试样轴向高度, A 为页岩试样横截面积, V_d 为下渗透参考体积, V_u 为上渗透参考体积;

步骤⑥:将渗透控制单元内的第十六截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的气体通过第十六截止阀放掉,之后将渗透控制单元内的所有截止阀调整为关闭状态;

步骤⑦:打开第一截止阀,启动空压机对腔室内进行排油,待油排空后关闭第一截止阀和空压机,用千斤顶加压后拧下下部承压台上的螺栓,使下部承压台与压力室壳体分离,最后拆除传感器和页岩试样。

一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于页岩油气开采技术领域,特别是涉及一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法。

背景技术

[0002] 随着能源的日益枯竭,非常规油气藏资源的勘探和开采变得尤为重要。页岩油与页岩气是典型的非常油气储层,我国页岩油储量与常规石油储量相当,页岩气储量居世界首位。尽管我国页岩油气资源丰富,但是页岩油气储层致密、低渗,其内部孔隙不发育,导致页岩内部油气难以流动。此外,页岩油储层多为中、低成熟度的富有机质岩石,中成熟度页岩内原油具有流动性,但是低成熟页岩内的油母质需要经过高温的作用才能转化为具有流动能力的原油。

[0003] 目前,页岩油气开采方法主要为水力压裂法,但水力压裂法需要消耗大量的水资源,中国页岩油气储层多赋存于缺水地区。此外,水力压裂后压裂液返排率较低,页岩油气储层中含有大量的粘土矿物,粘土矿物吸水后易膨胀,膨胀后堵塞油气的运移通道,导致页岩渗透率降低,最终使得页岩油气产量快速降低。

[0004] 微波辐射是一种新型的岩石致裂增产措施,微波具有穿透力强、选择性加热、易于控制等优点,通过岩石内部分子内摩擦产生高温,不需要任何传导介质就可以使岩石内外同时加热。页岩内矿物非均质性强,不同矿物对微波的吸收能力不同,进而在不同矿物间产生温度应力差,最终使页岩内部产生复杂的裂纹。此外,微波产生的高温可以使低成熟和中成熟页岩中的油母质转化为流动原油,提高页岩油的产能。水压致裂裂隙延展范围较广、微波致裂影响范围相对较小,页岩油气开采可利用水压致裂和微波致裂交替结合的方式,储层中滞留的压裂液可快速吸收微波转化为气体状态,产生高压气体破岩的效果。综上,水压致裂与微波致裂联用的方式可减少用水量、提高压裂破岩效率、增加裂网复杂性、提高产量。

[0005] 目前,微波致裂技术在非常规油气增产中并未应用和推广,其根本原因在于微波致裂增产技术的机理研究仍非常薄弱。实际页岩油气储层处于深部地层中,页岩油气储层承受着较高的地应力,微波产生的热应力与周围应力相互作用,最终使得页岩油气地层产生裂纹。再有,实际页岩油气储层处于一定的温度环境中,温度使得流体流动性增强,但也会使得页岩骨架膨胀,导致孔隙压缩,微波产生的高温会在原有储层温度上叠加。综上,考虑地应力和温度的微波试验研究才能真实的反映实际页岩油气储层的破裂特征。受试验装置与方法的限制,目前的微波致裂研究大多将试样从地层取出后直接置于微波炉中进行微波处理,处理后对试样施加以应力和流体压力进行力学或者渗流试验研究,这类试验方法的问题在于微波前试样上的地应力解除、温度也降为常温状态,而微波试验后再安装试样进行力学和渗透率测试,微波后的应力和温度也会被破坏,因此,这种试验方法并不能真实地反映地应力状态下裂隙实际发育的情况,测试得到的渗透率也并非致裂增透后地层的实际渗透率。此外,现有的压裂实验装置通常只能进行单一的水力压裂实验,无法满足水力压

裂和微波致裂同时作用下的页岩致裂增透实验研究。考虑地层实际应力与温度条件的微波致裂前后渗透率测试装置与方法的难点之一在于：微波后，试样温度随微波时间和功率快速增加，其温度可达到500℃以上，常规的渗透率测试试验装置最高耐温程度多为150℃，如何有效屏蔽微波产生的高温效应是原位微波致裂增透装置面临的关键问题。

发明内容

[0006] 针对现有技术存在的问题，本发明提供一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法，能够有效模拟地应力和地层温度环境，准确测定页岩在水力压裂和微波致裂同时作用前后的渗透率，从而通过渗透率演化对水力压裂和微波致裂联合增透效果进行评估。

[0007] 为了实现上述目的，本发明采用如下技术方案：一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置，包括三轴压力室单元、围压与轴压控制单元、水力压裂控制单元、微波致裂控制单元及渗透控制单元；所述三轴压力室单元包括压力室壳体、下部承压台、自平衡活塞、球面压头、上压头、轴压加载腔、围压加载腔；所述压力室壳体采用底端开口的圆柱筒型结构，压力室壳体竖直设置，所述下部承压台与压力室壳体的底端开口密封连接配合；所述自平衡活塞位于压力室壳体内部顶端，自平衡活塞与压力室壳体顶部壁板之间的腔室为轴压加载腔，自平衡活塞的活塞杆朝下延伸至压力室壳体内部的围压加载腔；在所述下部承压台上表面中心设有试样承载凸台，圆柱型的页岩试样竖直放置在试样承载凸台上，在页岩试样与试样承载凸台之间设置有多孔垫片，所述上压头竖直放置在页岩试样顶端，在页岩试样与上压头之间设置有多孔垫片，所述球面压头设置在上压头与自平衡活塞的活塞杆之间；在所述页岩试样外表面包覆有金属屏蔽网，在金属屏蔽网外部包覆有热缩套管，且热缩套管的上端延伸包覆在上压头上，热缩套管的下端延伸包覆在试样承载凸台上；在所述热缩套管外周侧套装有螺旋冷却盘管，在所述压力室壳体外部设置有高低温循环一体机，所述螺旋冷却盘管通过冷却循环管路与高低温循环一体机相连通；在所述上压头与下部承压台之间连接有压弹式轴向位移传感器且分立两侧；在所述围压加载腔所处的压力室壳体内表面设置有线圈式加热器；在所述热缩套管外表面贴装有第一温度传感器，在所述下部承压台上表面安装有第二温度传感器和第三温度传感器；所述微波致裂控制单元包括微波发射探头和微波发生器；在所述页岩试样下半段的内部中心开设有微波致裂孔，在页岩试样上半段的内部中心开设有水力压裂孔；所述微波发射探头位于微波致裂孔内，所述微波发生器位于压力室壳体外部，微波发生器与微波发射探头通过微波传输线相连；在所述压力室壳体内部设有水力压裂管，水力压裂管一端通过上压头内开设的通道密封插装在水力压裂孔内，水力压裂管另一端通过下部承压台内开设的通道延伸至压力室壳体外部并接入水力压裂控制单元；在所述压力室壳体内部设有上渗流通气管，上渗流通气管一端通过上压头内开设的通道与页岩试样上表面密封连通，上渗流通气管另一端通过下部承压台内开设的通道延伸至压力室壳体外部并接入渗透控制单元；在所述下部承压台内设有下渗流通气管，下渗流通气管一端与页岩试样下表面密封连通，下渗流通气管另一端延伸至压力室壳体外部并接入渗透控制单元；在所述轴压加载腔所在处的压力室壳体侧向壁板上开设有轴压加载孔，轴压加载腔通过轴压加载孔接入围压与轴压控制单元；在所述下部承压台内开设有围压加载孔，围压加载腔通过围压加载孔接入围压与轴压控制单元；在所述

围压加载腔所在处的压力室壳体侧向壁板上开设有压缩空气注入孔,在压力室壳体外部设置有空压机,所述围压加载腔通过压缩空气注入孔与空压机相连,在压缩空气注入孔与空压机之间的管路上设置有第一截止阀。

[0008] 所述围压与轴压控制单元包括轴压泵、围压泵及控油油箱;所述轴压泵通过管路与轴压加载孔相连通,在轴压泵与轴压加载孔之间的管路上依次设置有第二截止阀、第一压力传感器、第一三通、第一稳压阀及第二三通;所述围压泵通过管路与围压加载孔相连通,在围压泵与围压加载孔之间的管路上依次设置有第三截止阀、第二压力传感器、第三三通、第二稳压阀及第四三通;所述第一三通与第三三通通过管路相连通,在第一三通与第三三通之间的管路上依次设置有第四截止阀、第五三通、第六三通、第七三通及第五截止阀;所述控油油箱与第六三通相连通;所述第二三通与第五三通通过管路相连通,在第二三通与第五三通之间的管路上依次设置有第六截止阀和第一单向阀;所述第四三通与第七三通通过管路相连通,在第四三通与第七三通之间的管路上依次设置有第七截止阀和第二单向阀。

[0009] 所述水力压裂控制单元包括第一压裂泵、第二压裂泵、第一储液罐、第二储液罐及废液回收罐;所述第一压裂泵通过管路与水力压裂管相连通,在第一压裂泵与水力压裂管之间的管路上依次设置有第三压力传感器、第一流量传感器、第一减压阀、第八截止阀、第八三通及第九三通;所述第一储液罐通过管路与第一压裂泵相连通,在第一储液罐与第一压裂泵之间的管路上设置有第九截止阀;所述第二压裂泵通过管路与第八三通相连通,在第二压裂泵与第八三通之间的管路上依次设置有第四压力传感器、第二流量传感器及第十截止阀;所述第二储液罐通过管路与第二压裂泵相连通,在第二储液罐与第二压裂泵之间的管路上设置有第十一截止阀;所述废液回收罐通过管路与第九三通相连通,在废液回收罐与第九三通之间的管路上依次设置有第五压力传感器和第十二截止阀。

[0010] 所述渗透控制单元包括高压气瓶、第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器、第二容器、真空泵及气象色谱仪;所述高压气瓶分两路输出,第一路依次通过第一高压注入泵及第一容器与上渗流通气管相连通,第二路依次通过第二高压注入泵及第二容器与下渗流通气管相连通;在所述第一高压注入泵与第二高压注入泵之间的管路上依次设置有第十三截止阀、第十三三通及第十四截止阀;所述高压气瓶与第十三三通相连通,在高压气瓶与第十三三通之间的管路上依次设置有第十五截止阀、第二减压阀及第十一三通,大气与第十一三通相连通,在大气与第十一三通之间的管路上设置有第十六截止阀;在所述第一高压注入泵与第一容器之间的管路上设置有第十七截止阀;在所述第二高压注入泵与第二容器之间的管路上设置有第十八截止阀;在所述第一容器与上渗流通气管之间的管路上依次设置有第十九截止阀、第十二三通、第十三三通、第十四三通、第十五三通及第二十截止阀;在所述第二容器与下渗流通气管之间的管路上依次设置有第二十一截止阀、第十六三通、第十七三通、第十八三通及第二十二截止阀;所述第十二三通与第十六三通通过管路相连通,在第十二三通与第十六三通之间的管路上依次设置有第二十三截止阀、第十九三通及第二十四截止阀;所述真空泵与第十九三通相连通;所述第十三三通通过管路连接有第六压力传感器,在第六压力传感器与第十三三通之间的管路上设置有第二十五截止阀;所述第十七三通过管路连接有第七压力传感器,在第七压力传感器与第十七三通之间的管路上设置有第二十六截止阀;所述第十四三通与第十八三通通过管路相连通,在第十四三通与第十八

三通之间的管路上依次设置有第二十七截止阀、压差传感器及第二十八截止阀;所述气象色谱仪与第十五三通相连通,在气象色谱仪与第十五三通之间的管路上设置有第二十九截止阀。

[0011] 在所述压力室壳体外部设置有信息采集器和计算机,所述第一温度传感器、第二温度传感器、第三温度传感器、第一压力传感器、第二压力传感器、第三压力传感器、第四压力传感器、第五压力传感器、第六压力传感器、第七压力传感器、第一流量传感器、第二流量传感器、压差传感器及压弹式轴向位移传感器的信号输出端与信息采集器进行电连接,信息采集器的信号输出端与计算机进行电连接。

[0012] 一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验方法,采用了所述水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,包括如下步骤:

[0013] 步骤一:标定体积

[0014] 步骤①:对渗透控制单元内的所有管路进行检漏,首先关闭第二十截止阀和第二十二截止阀,同时使渗透控制单元内的其他所有截止阀处于开启状态,然后打开高压气瓶向管路内充气增压,待充气增压结束后关闭高压气瓶,之后将所有开启的截止阀调整到关闭状态,最后利用检漏液逐一对所有管路接口进行检漏,全部检漏合格后方可执行后续步骤;

[0015] 步骤②:准备一块标准钢样,标准钢样与页岩试样尺寸完全相同,且标准钢样上无需加工微波致裂孔和水力压裂孔,并在标准钢样上、下端分别放置上多孔垫片和下多孔垫片,再将其装夹到上压头与试样承载凸台之间;将标准钢样中心对准上压头及试样承载凸台中心,外部套上热缩套管进行隔绝密封,将第一温度传感器紧贴热缩套管表面设置;与页岩试样装夹时的区别在于,无需安装金属屏蔽网、微波发射探头及水力压裂管;

[0016] 步骤③:打开第二截止阀、第四截止阀,将轴压加载腔和轴压泵充满油,充满油后关闭第四截止阀,打开第三截止阀、第五截止阀,将围压加载腔和围压泵充满油,充满油后关闭第五截止阀;设置围压泵压力为 σ_{c1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第二稳压阀的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔保持在指定压力值 σ_{c1} ,为标准钢样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵压力 σ_{d1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第一稳压阀的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔保持在指定压力值 σ_{d1} ,为标准钢样提供轴压 σ_{d1} ;

[0017] 步骤④:将第十三截止阀、第十四截止阀、第十五截止阀、第十七截止阀、第十八截止阀、第十九截止阀、第二十截止阀、第二十一截止阀、第二十二截止阀、第二十三截止阀、第二十四截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵,将下多孔垫片、上多孔垫片、上渗流通气管、下渗流通气管以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,之后关闭第二十三截止阀和第二十四截止阀,最后关停真空泵;

[0018] 步骤⑤:先关闭第十七截止阀和第十八截止阀,然后调节第二减压阀至设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶,在设定压力 P_1 下向第一高压注入泵和第二高压注入泵内充入渗透测试气体,直到第一高压注入泵和第二高压注入泵内的气体压力也达到设定压力 P_1 且保持恒定,然后关闭第十三截止阀和第十四截止阀,最后关闭高压气瓶;

[0019] 步骤⑥:启动线圈式加热器,用以加热标准钢样,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境

内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程中整个室内温度保持不变;然后记录下此时第一高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_1 ;同时记录下此时第二高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_2 ;

[0020] 步骤⑦:分别确定上渗透参考体积和下渗透参考体积;当确定上渗透参考体积时,先关闭第二十截止阀,然后打开第十七截止阀,通过第一高压注入泵向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直到第一高压注入泵内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第一高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{12} ;最后按照公式 $V_u = V_1 - V_{12}$ 计算出上渗透参考体积,式中的 V_u 即为上渗透参考体积;当确定下渗透参考体积时,先关闭第二十二截止阀,然后打开第十八截止阀,通过第二高压注入泵向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直到第二高压注入泵内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第二高压注入泵内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{22} ;最后按照公式 $V_d = V_2 - V_{22}$ 计算出下渗透参考体积,式中的 V_d 即为下渗透参考体积;

[0021] 步骤二:安装试样

[0022] 步骤①:将标准钢样拆除,然后准备一块页岩试样,并在页岩试样上、下端面中心处分别钻削加工出水力压裂孔和微波致裂孔;

[0023] 步骤②:将微波发射探头安装到试样承载凸台上,之后将微波发射探头接入微波发生器;同时,将水力压裂管安装到上压头上,之后将水力压裂管接入水力压裂控制单元,水力压裂管与上压头和下部承压台保证密封连接;

[0024] 步骤③:先将下多孔垫片放置到试样承载凸台上,然后将页岩试样放置到下多孔垫片上,使微波发射探头插入微波致裂孔内,再将上多孔垫片放置到页岩试样上,之后用金属屏蔽网将页岩试样、上多孔垫片及下多孔垫片包裹密封;

[0025] 步骤④:在页岩试样外部依次套装上热缩套管和螺旋冷却盘管,之后将螺旋冷却盘管接入高低温循环一体机,然后将上压头放置到上多孔垫片,使水力压裂管插入水力压裂孔内,水力压裂管底部距钻孔底部的距离为 $1/3$ 的钻孔深度,且在水力压裂管插入之前,需要在水力压裂管管口处安装上密封胶圈,在密封胶圈上方缠绕密封胶带,保证水力压裂管与水力压裂孔之间的密封性,然后在水力压裂管中上部用注射器分层注入耐高温密封胶,直到注满为止,最后利用热风枪加热热缩套管直到其紧密包裹在页岩试样上;

[0026] 步骤⑤:将压弹式轴向位移传感器安装到上压头与下部承压台之间,之后将第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器安装到位,最后通过千斤顶抬升下部承压台并与压力室壳体扣合在一起,再通过螺栓将下部承压台固定在压力室壳体上,直至完成压力室壳体与下部承压台的封装;

[0027] 步骤三:模拟地应力和地层温度环境

[0028] 步骤①:首先打开围压与轴压控制单元的第四截止阀、第五截止阀、第一稳压阀和第二稳压阀,然后启动控油油箱向轴压加载腔和围压加载腔内充入液压油,直到轴压加载腔和围压加载腔内的液压油充满,之后关闭第一稳压阀和第二稳压阀;

[0029] 步骤②:首先打开第二截止阀和第三截止阀,然后通过控油油箱向轴压泵和围压泵内充入液压油,直到轴压泵和围压泵内的充油量达到90%后充油结束,之后关闭第二截止阀和第三截止阀,最后关闭控油油箱;

[0030] 步骤③:启动线圈式加热器,用以加热页岩试样,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程整个室内温度保持不变,此时完成地层温度环境的模拟;

[0031] 步骤④:设置围压泵压力为 σ_{c1} ,打开第三截止阀,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第二稳压阀的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔保持在指定压力值 σ_{c1} ,为页岩试样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵压力 σ_{d1} ,打开第二截止阀,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第一稳压阀的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔保持在指定压力值 σ_{d1} ,为页岩试样提供轴压 σ_{d1} ;此时完成地应力的模拟;

[0032] 步骤四:水力压裂

[0033] 步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,采用定压压裂方式或定流量压裂方式;当采用定压压裂方式时,首先打开第八截止阀和第九截止阀,压裂液由第一储液罐流出,先经第一压裂泵增压,再依次经第一减压阀和水力压裂管后以设定压力流入页岩试样的水力压裂孔内,直至完成页岩试样的水力压裂;当采用定流量压裂方式时,首先打开第十截止阀和第十一截止阀,压裂液由第二储液罐流出,先经第二压裂泵增压,再直接通过水力压裂管后以设定流量流入页岩试样的水力压裂孔内,直至完成页岩试样的水力压裂;

[0034] 步骤②:当页岩试样完成水力压裂后,打开第十二截止阀,将压裂液卸压回收至废液回收罐内;

[0035] 步骤五:微波致裂

[0036] 步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,调节第一单向阀数值为 σ_{d1} ,调节第二单向阀数值为 σ_{c1} ,首先打开围压与轴压控制单元的第六截止阀和第七截止阀,同时打开渗透控制单元的第二十截止阀和第二十五截止阀,然后启动微波发生器,进而通过微波发射探头向页岩试样输入微波辐射,进而使页岩试样内部产生高温以实现致裂作用,此时页岩试样会因微波作用产生气体,而气体的产生会导致压力变化,而该压力变化则通过第六压力传感器进行实时监测,同时页岩试样温度则由第一温度传感器进行实时监测,如果温度超过设定值,则立即启动高低温循环一体机,进而通过螺旋冷却盘管对页岩试样进行降温,防止温度过高造成热缩套管变形和油温过高损坏元件;在对页岩试样进行微波致裂过程中,因受热造成的油压升高,会触发第一单向阀和第二单向阀开启,使多出的液压油流回到油箱内部,从而维持围压和轴压的恒定;

[0037] 步骤②:当微波致裂达到设定时间后,关闭微波发生器,之后当第一温度传感器所监测的温度值低于地层温度环境模拟下的温度设定值后,关闭高低温循环一体机;当第六压力传感器所监测的压力值不再变化时,说明页岩试样内不再产生气体;之后关闭第六截止阀和第七截止阀,最后再次启动线圈式加热器对页岩试样进行加热,直到第一温度传感器、第二温度传感器及第三温度传感器监测的温度均重新达到设定值;

[0038] 步骤③:打开第二十九截止阀,将管路中的气体导入气象色谱仪中,之后立即关闭第二十九截止阀,通过气象色谱仪对管路中的气体成分和含量进行分析;最后将装置内的所有截止阀均调整为关闭状态;

[0039] 步骤六:试样渗透率测量

[0040] 步骤①:将第十三截止阀、第十四截止阀、第十五截止阀、第十七截止阀、第十八截止阀、第十九截止阀、第二十截止阀、第二十一截止阀、第二十二截止阀、第二十三截止阀、第二十四截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵,将下多孔垫片、上多孔垫片、上渗流通气管、下渗流通气管以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,打开第二十五截止阀、第二十六截止阀、第二十七截止阀、第二十八截止阀,抽真空15秒,之后关闭第二十三截止阀和第二十四截止阀,最后关停真空泵;

[0041] 步骤②:先关闭第二十截止阀和第二十二截止阀,然后调节第二减压阀使压力达到设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶,在设定压力 P_1 下将第一高压注入泵、第二高压注入泵、第一容器及第二容器内充满渗透测试气体,之后关闭第十三截止阀、第十四截止阀和第十五截止阀,运行第一高压注入泵和第二高压注入泵,使渗透控制单元内的压力达到设定压力 P_1 且保持恒定;

[0042] 步骤③:打开第二十截止阀和第二十二截止阀,通过第一高压注入泵、第二高压注入泵同步以设定压力 P_1 向页岩试样内注入渗透测试气体,直到压差传感器的读数为零时结束,之后关闭第二十截止阀和第二十二截止阀;

[0043] 步骤④:先关闭第十七截止阀,使上渗透控制单元变为定容状态,然后升高第二高压注入泵至设定压力 P_2 ,待压力稳定后,再关闭第十八截止阀,使下渗透控制单元变为定容状态,并记录下此时第七压力传感的读数,并将该压力读数记为 P_0 ,同时将此刻记为 T_0 ;

[0044] 步骤⑤:打开第二十截止阀和第二十二截止阀,渗透测试气体开始进入页岩试样内进行渗透,直到压差传感器的读数稳定后,记录下此时第七压力传感器的读数,并将该压力读数记为 P_n ,同时将此刻记为 T_n ;最后按照如下公式计算页岩试样的渗透率;

$$K = -\frac{\ln P_n - \ln P_0}{T_n - T_0} \cdot \frac{C\mu L}{A \left(\frac{1}{V_d} + \frac{1}{V_u} \right)}$$

[0045]

[0046] 式中, K 为渗透率, P_n 为渗透结束后下渗端压力, P_0 为渗透开始前下渗端压力, T_n 为渗透结束时刻, T_0 为渗透起始时刻, C 为渗透测试气体压缩系数, μ 为渗透测试气体粘度, L 为页岩试样轴向高度, A 为页岩试样横截面积, V_d 为下渗透参考体积, V_u 为上渗透参考体积;

[0047] 步骤⑥:将渗透控制单元内的第十六截止阀调整为开启状态,将渗透控制单元内的气体通过第十六截止阀放掉,之后将渗透控制单元内的所有截止阀调整为关闭状态;

[0048] 步骤⑦:打开第一截止阀,启动空压机对腔室内进行排油,待油排空后关闭第一截止阀和空压机,用千斤顶加压后拧下下部承压台上的螺栓,使下部承压台与压力室壳体分离,最后拆除传感器和页岩试样。

[0049] 本发明的有益效果:

[0050] 1.本发明可以提供测定页岩渗透性能所需的深部高地应力和高温环境,本发明轴向压力可达300MPa,围压可达100MPa,注入气体压力可达100MPa,微波实验前最高温度可达到150℃。

[0051] 2.本发明可以还原页岩实际所处不同地应力及地层温度环境,对其进行水力压裂和微波致裂,测定致裂前后页岩渗透率的变化,当温度过高引起油压升高时,可以通过压力可调节式单向阀使多余的液压油流回油箱内,防止局部压力过高对内部元件造成损坏。

[0052] 3.本发明选用铅箔做为微波屏蔽网,相比于其他屏蔽网具有更好的延展性和屏蔽效果,且成本较低。

[0053] 4.由于微波在试样内部作用时产生大量的热,会造成局部油温过高,本发明的温度传感器和冷循环系统会及时进行温度监测和降温处理,防止油温过高造成元件损坏,安全高效,缩短了实验周期。

[0054] 5.恒温后,本发明的温度波动误差可控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内,气体体积误差可控制在0.3%以内,注入压力误差可控制在0.5%以内,使获取的测试结果更为准确。

[0055] 6.本发明采用的气象色谱仪可以分析出微波作用下的页岩产生的气体种类和含量。

[0056] 综上所述,本发明的水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置及方法,能够有效模拟地应力和地层温度环境,准确测定页岩在水力压裂和微波致裂同时作用前后的渗透率,从而通过渗透率演化对水力压裂和微波致裂联合增透效果进行评估。

附图说明

[0057] 图1为本发明的一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置的结构原理图;

[0058] 图2为本发明的三轴压力室单元(已完成页岩试样的安装)的结构示意图;

[0059] 图中,1—压力室壳体,2—下部承压台,3—自平衡活塞,4—球面压头,5—上压头,6—轴压加载腔,7—围压加载腔,8—试样承载凸台,9—页岩试样,10—下多孔垫片,11—上多孔垫片,12—金属屏蔽网,13—热缩套管,14—螺旋冷却盘管,15—高低温循环一体机,16—压弹式轴向位移传感器,17—线圈式加热器,18—第一温度传感器,19—第二温度传感器,20—第三温度传感器,21—微波发射探头,22—微波发生器,23—微波致裂孔,24—水力压裂孔,25—水力压裂管,26—上渗流通气管,27—下渗流通气管,28—轴压加载孔,29—围压加载孔,30—压缩空气注入孔,31—空压机,32—轴压泵,33—围压泵,34—控油油箱,35—第一压力传感器,36—第二压力传感器,37—第一压裂泵,38—第二压裂泵,39—第一储液罐,40—第二储液罐,41—废液回收罐,42—第三压力传感器,43—第一流量传感器,44—第四压力传感器,45—第二流量传感器,46—第五压力传感器,47—高压气瓶,48—第一高压注入泵,49—第二高压注入泵,50—第一容器,51—第二容器,52—真空泵,53—气象色谱仪,54—第六压力传感器,55—第七压力传感器,56—压差传感器,V1—第一截止阀,V2—第二截止阀,V3—第三截止阀,V4—第四截止阀,V5—第五截止阀,V6—第六截止阀,V7—第七截止阀,V8—第八截止阀,V9—第九截止阀,V10—第十截止阀,V11—第十一截止阀,V12—第十二截止阀,V13—第十三截止阀,V14—第十四截止阀,V15—第十五截止阀,V16—第十六截止阀,V17—第十七截止阀,V18—第十八截止阀,V19—第十九截止阀,V20—第二十截止阀,V21—第二十一截止阀,V22—第二十二截止阀,V23—第二十三截止阀,V24—第二十四截止阀,V25—第二十五截止阀,V26—第二十六截止阀,V27—第二十七截止阀,V28—第二十八截止阀,V29—第二十九截止阀,W1—第一稳压阀,W2—第二稳压阀,R1—第一减压阀,R2—第二减压阀,C1—第一单向阀,C2—第二单向阀,T1—第一三通,T2—第二三通,T3—第三三通,T4—第四三通,T5—第五三通,T6—第六三通,T7—第七三通,T8—第八三通,T9—第九三通,T10—第十三通,T11—第十一三通,T12—第十二三通,T13—第十三

三通,T14—第十四三通,T15—第十五三通,T16—第十六三通,T17—第十七三通,T18—第十八三通,T19—第十九三通。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图和具体实施例对本发明做进一步的详细说明。

[0061] 如图1、2所示,一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,包括三轴压力室单元、围压与轴压控制单元、水力压裂控制单元、微波致裂控制单元及渗透控制单元;所述三轴压力室单元包括压力室壳体1、下部承压台2、自平衡活塞3、球面压头4、上压头5、轴压加载腔6、围压加载腔7;所述压力室壳体1采用底端开口的圆柱筒型结构,压力室壳体1竖直设置,所述下部承压台2与压力室壳体1的底端开口密封连接配合;所述自平衡活塞3位于压力室壳体1内部顶端,自平衡活塞3与压力室壳体1顶部壁板之间的腔室为轴压加载腔6,自平衡活塞3的活塞杆朝下延伸至压力室壳体1内部的围压加载腔7;在所述下部承压台2上表面中心设有试样承载凸台8,圆柱型的页岩试样9竖直放置在试样承载凸台8上,在页岩试样9与试样承载凸台8之间设置有多孔垫片10,所述上压头5竖直放置在页岩试样9顶端,在页岩试样9与上压头5之间设置有多孔垫片11,所述球面压头4设置在上压头5与自平衡活塞3的活塞杆之间;在所述页岩试样9外表面包覆有金属屏蔽网12,在金属屏蔽网12外部包覆有热缩套管13,且热缩套管13的上端延伸包覆在上压头5上,热缩套管13的下端延伸包覆在试样承载凸台8上;在所述热缩套管13外周侧套装有螺旋冷却盘管14,在所述压力室壳体1外部设置有高低温循环一体机15,所述螺旋冷却盘管14通过冷却循环管路与高低温循环一体机15相连通;在所述上压头5与下部承压台2之间连接有压弹式轴向位移传感器16且分立两侧;在所述围压加载腔7所处的压力室壳体1内表面设置有线圈式加热器17;在所述热缩套管13外表面贴装有第一温度传感器18,在所述下部承压台2上表面安装有第二温度传感器19和第三温度传感器20;所述微波致裂控制单元包括微波发射探头21和微波发生器22;在所述页岩试样9下半段的内部中心开设有微波致裂孔23,在页岩试样9上半段的内部中心开设有水力压裂孔24;所述微波发射探头21位于微波致裂孔23内,所述微波发生器22位于压力室壳体1外部,微波发生器22与微波发射探头21通过微波传输线相连;在所述压力室壳体1内部设有水力压裂管25,水力压裂管25一端通过上压头5内开设的通道密封插装在水力压裂孔24内,水力压裂管25另一端通过下部承压台2内开设的通道延伸至压力室壳体1外部并接入水力压裂控制单元;在所述压力室壳体1内部设有上渗流通气管26,上渗流通气管26一端通过上压头5内开设的通道与页岩试样9上表面密封连通,上渗流通气管26另一端通过下部承压台2内开设的通道延伸至压力室壳体1外部并接入渗透控制单元;在所述下部承压台2内设有下渗流通气管27,下渗流通气管27一端与页岩试样9下表面密封连通,下渗流通气管27另一端延伸至压力室壳体1外部并接入渗透控制单元;在所述轴压加载腔6所在处的压力室壳体1侧向壁板上开设有轴压加载孔28,轴压加载腔6通过轴压加载孔28接入围压与轴压控制单元;在所述下部承压台2内开设有围压加载孔29,围压加载腔7通过围压加载孔29接入围压与轴压控制单元;在所述围压加载腔7所在处的压力室壳体1侧向壁板上开设有压缩空气注入孔30,在压力室壳体1外部设置有空压机31,所述围压加载腔7通过压缩空气注入孔30与空压机31相连,在压缩空气注入孔30与空压机31之间的管路上设置有第一截止阀V1。

[0062] 所述围压与轴压控制单元包括轴压泵32、围压泵33及控油油箱34;所述轴压泵32通过管路与轴压加载孔28相连通,在轴压泵32与轴压加载孔28之间的管路上依次设置有第二截止阀V2、第一压力传感器35、第一三通T1、第一稳压阀W1及第二三通T2;所述围压泵33通过管路与围压加载孔29相连通,在围压泵33与围压加载孔29之间的管路上依次设置有第三截止阀V3、第二压力传感器36、第三三通T3、第二稳压阀W2及第四三通T4;所述第一三通T1与第三三通T3通过管路相连通,在第一三通T1与第三三通T3之间的管路上依次设置有第四截止阀V4、第五三通T5、第六三通T6、第七三通T7及第五截止阀V5;所述控油油箱34与第六三通T6相连通;所述第二三通T2与第五三通T5通过管路相连通,在第二三通T2与第五三通T5之间的管路上依次设置有第六截止阀V6和第一单向阀C1;所述第四三通T4与第七三通T7通过管路相连通,在第四三通T4与第七三通T7之间的管路上依次设置有第七截止阀V7和第二单向阀C2。

[0063] 所述水力压裂控制单元包括第一压裂泵37、第二压裂泵38、第一储液罐39、第二储液罐40及废液回收罐41;所述第一压裂泵37通过管路与水力压裂管25相连通,在第一压裂泵37与水力压裂管25之间的管路上依次设置有第三压力传感器42、第一流量传感器43、第一减压阀R1、第八截止阀V8、第八三通T8及第九三通T9;所述第一储液罐39通过管路与第一压裂泵37相连通,在第一储液罐39与第一压裂泵37之间的管路上设置有第九截止阀V9;所述第二压裂泵38通过管路与第八三通T8相连通,在第二压裂泵38与第八三通T8之间的管路上依次设置有第四压力传感器44、第二流量传感器45及第十截止阀V10;所述第二储液罐40通过管路与第二压裂泵38相连通,在第二储液罐40与第二压裂泵38之间的管路上设置有第十一截止阀V11;所述废液回收罐41通过管路与第九三通T9相连通,在废液回收罐41与第九三通T9之间的管路上依次设置有第五压力传感器46和第十二截止阀V12。

[0064] 所述渗透控制单元包括高压气瓶47、第一高压注入泵48、第二高压注入泵49、第一容器50、第二容器51、真空泵52及气象色谱仪53;所述高压气瓶47分两路输出,第一路依次通过第一高压注入泵48及第一容器50与上渗流通气管26相连通,第二路依次通过第二高压注入泵49及第二容器51与下渗流通气管27相连通;在所述第一高压注入泵48与第二高压注入泵49之间的管路上依次设置有第十三截止阀V13、第十三三通T10及第十四截止阀V14;所述高压气瓶47与第十三三通T10相连通,在高压气瓶47与第十三三通T10之间的管路上依次设置有第十五截止阀V15、第二减压阀R2及第十一三通T11,大气与第十一三通T11相连通,在大气与第十一三通T11之间的管路上设置有第十六截止阀V16;在所述第一高压注入泵48与第一容器50之间的管路上设置有第十七截止阀V17;在所述第二高压注入泵49与第二容器51之间的管路上设置有第十八截止阀V18;在所述第一容器50与上渗流通气管26之间的管路上依次设置有第十九截止阀V19、第十二三通T12、第十三三通T13、第十四三通T14、第十五三通T15及第二十截止阀V20;在所述第二容器51与下渗流通气管27之间的管路上依次设置有第二十一截止阀V21、第十六三通T16、第十七三通T17、第十八三通T18及第二十二截止阀V22;所述第十二三通T12与第十六三通T16通过管路相连通,在第十二三通T12与第十六三通T16之间的管路上依次设置有第二十三截止阀V23、第十九三通T19及第二十四截止阀V24;所述真空泵52与第十九三通T19相连通;所述第十三三通T13通过管路连接有第六压力传感器54,在第六压力传感器54与第十三三通T13之间的管路上设置有第二十五截止阀V25;所述第十七三通T17通过管路连接有第七压力传感器55,在第七压力传感器55与第十

七三通T17之间的管路上设置有第二十六截止阀V26;所述第十四三通T14与第十八三通T18通过管路相连通,在第十四三通T14与第十八三通T18之间的管路上依次设置有第二十七截止阀V27、压差传感器56及第二十八截止阀V28;所述气象色谱仪53与第十五三通T15相连通,在气象色谱仪53与第十五三通T15之间的管路上设置有第二十九截止阀V29。

[0065] 在所述压力室壳体1外部设置有信息采集器和计算机,所述第一温度传感器18、第二温度传感器19、第三温度传感器20、第一压力传感器35、第二压力传感器36、第三压力传感器42、第四压力传感器44、第五压力传感器46、第六压力传感器54、第七压力传感器55、第一流量传感器43、第二流量传感器45、压差传感器56及压弹式轴向位移传感器16的信号输出端与信息采集器进行电连接,信息采集器的信号输出端与计算机进行电连接。

[0066] 本实施例中,所有管路均采用不锈钢管路,其中水力压裂控制单元中的水力压裂管25采用不锈钢金属软管,所有阀门均选用耐高温耐腐蚀型号,在所有不锈钢管路上以及第一容器50和第二容器51外部均包裹有保温夹套。高压气瓶47内用于存储渗透测试气体,渗透测试气体为氦气或氮气;金属屏蔽网12优选铅箔。

[0067] 一种水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验方法,采用了所述水力压裂和微波致裂联合增透页岩的实验装置,包括如下步骤:

[0068] 步骤一:标定体积

[0069] 步骤①:对渗透控制单元内的所有管路进行检漏,首先关闭第二十截止阀V20和第二十二截止阀V22,同时使渗透控制单元内的其他所有截止阀处于开启状态,然后打开高压气瓶47向管路内充气增压,待充气增压结束后关闭高压气瓶47,之后将所有开启的截止阀调整到关闭状态,最后利用检漏液逐一对所有管路接口进行检漏,全部检漏合格后方可执行后续步骤;

[0070] 步骤②:准备一块标准钢样,标准钢样与页岩试样9尺寸完全相同,且标准钢样上无需加工微波致裂孔23和水力压裂孔24,并在标准钢样上、下端分别放置上多孔垫片11和下多孔垫片10,再将其装夹到上压头4与试样承载凸台8之间;将标准钢样中心对准上压头5及试样承载凸台8中心,外部套上热缩套管13进行隔绝密封,将第一温度传感器18紧贴热缩套管13表面设置;与页岩试样9装夹时的区别在于,无需安装金属屏蔽网12、微波发射探头21及水力压裂管25;

[0071] 步骤③:打开第二截止阀V2、第四截止阀V4,将轴压加载腔6和轴压泵32充满油,充满油后关闭第四截止阀V4,打开第三截止阀V3、第五截止阀V5,将围压加载腔7和围压泵33充满油,充满油后关闭第五截止阀V5;设置围压泵33压力为 σ_{c1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第二稳压阀W2的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔7保持在指定压力值 σ_{c1} ,为标准钢样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵32压力 σ_{d1} ,开始对标准钢样加压,压力稳定后设定第一稳压阀W1的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔6保持在指定压力值 σ_{d1} ,为标准钢样提供轴压 σ_{d1} ;

[0072] 步骤④:将第十三截止阀V13、第十四截止阀V14、第十五截止阀V15、第十七截止阀V17、第十八截止阀V18、第十九截止阀V19、第二十截止阀V20、第二十一截止阀V21、第二十二截止阀V22、第二十三截止阀V23、第二十四截止阀V24调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵52,将下多孔垫片10、上多孔垫片11、上渗流通气管26、下渗流通气管27以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,之后关闭第二十三截止阀V23和第二十四截止阀V24,最后关停

真空泵52;

[0073] 步骤⑤:先关闭第十七截止阀V17和第十八截止阀V18,然后调节第二减压阀R2至设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶47,在设定压力 P_1 下向第一高压注入泵48和第二高压注入泵49内充入渗透测试气体,直到第一高压注入泵48和第二高压注入泵49内的气体压力也达到设定压力 P_1 且保持恒定,然后关闭第十三截止阀V13和第十四截止阀V14,最后关闭高压气瓶47;

[0074] 步骤⑥:启动线圈式加热器17,用以加热标准钢样,直到第一温度传感器18、第二温度传感器19及第三温度传感器20监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵48、第二高压注入泵49、第一容器50及第二容器51的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程中整个室内温度保持不变;然后记录下此时第一高压注入泵48内的气体体积,并将该气体体积记为 V_1 ;同时记录下此时第二高压注入泵49内的气体体积,并将该气体体积记为 V_2 ;

[0075] 步骤⑦:分别确定上渗透参考体积和下渗透参考体积;当确定上渗透参考体积时,先关闭第二十截止阀V20,然后打开第十七截止阀V17,通过第一高压注入泵48向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直到第一高压注入泵48内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第一高压注入泵48内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{12} ;最后按照公式 $V_u = V_1 - V_{12}$ 计算出上渗透参考体积,式中的 V_u 即为上渗透参考体积;当确定下渗透参考体积时,先关闭第二十二截止阀V22,然后打开第十八截止阀V18,通过第二高压注入泵49向连通管路空腔内注入渗透测试气体,直到第二高压注入泵49内的气体体积不再发生变化,然后记录下此时第二高压注入泵49内的气体体积,并将该气体体积记为 V_{22} ;最后按照公式 $V_d = V_2 - V_{22}$ 计算出下渗透参考体积,式中的 V_d 即为下渗透参考体积;

[0076] 步骤二:安装试样

[0077] 步骤①:将标准钢样拆除,然后准备一块页岩试样9,并在页岩试样9上、下端面中心处分别钻削加工出水力压裂孔24和微波致裂孔23;

[0078] 步骤②:将微波发射探头21安装到试样承载凸台8上,之后将微波发射探头21接入微波发生器22;同时,将水力压裂管25安装到上压头5上,之后将水力压裂管25接入水力压裂控制单元,水力压裂管25与上压头5和下部承压台2保证密封连接;

[0079] 步骤③:先将下多孔垫片10放置到试样承载凸台8上,然后将页岩试样9放置到下多孔垫片10上,使微波发射探头21插入微波致裂孔23内,再将上多孔垫片11放置到页岩试样9上,之后用金属屏蔽网12将页岩试样9、上多孔垫片11及下多孔垫片10包裹密封;

[0080] 步骤④:在页岩试样9外部依次套装上热缩套管13和螺旋冷却盘管14,之后将螺旋冷却盘管14接入高低温循环一体机15,然后将上压头5放置到上多孔垫片11,使水力压裂管25插入水力压裂孔24内,水力压裂管25底部距钻孔底部的距离为1/3的钻孔深度,且在水力压裂管25插入之前,需要在水力压裂管25管口处安装上密封胶圈,在密封胶圈上方缠绕密封胶带,保证水力压裂管25与水力压裂孔24之间的密封性,然后在水力压裂管25中上部用注射器分层注入耐高温密封胶,直到注满为止,最后利用热风枪加热热缩套管13直到其紧密包裹在页岩试样9上;

[0081] 步骤⑤:将压弹式轴向位移传感器16安装到上压头5与下部承压台2之间,之后将

第一温度传感器18、第二温度传感器19及第三温度传感器20安装到位,最后通过千斤顶抬升下部承压台2并与压力室壳体1扣合在一起,再通过螺栓将下部承压台2固定在压力室壳体1上,直至完成压力室壳体1与下部承压台2的封装;

[0082] 步骤三:模拟地应力和地层温度环境

[0083] 步骤①:首先打开围压与轴压控制单元的第四截止阀V4、第五截止阀V5、第一稳压阀W1和第二稳压阀W2,然后启动控油油箱34向轴压加载腔6和围压加载腔7内充入液压油,直到轴压加载腔6和围压加载腔7内的液压油充满,之后关闭第一稳压阀W1和第二稳压阀W2;

[0084] 步骤②:首先打开第二截止阀V2和第三截止阀V3,然后通过控油油箱34向轴压泵32和围压泵33内充入液压油,直到轴压泵32和围压泵33内的充油量达到90%后充油结束,之后关闭第二截止阀V2和第三截止阀V3,最后关闭控油油箱34;

[0085] 步骤③:启动线圈式加热器17,用以加热页岩试样9,直到第一温度传感器18、第二温度传感器19及第三温度传感器20监测的温度均达到设定值,同时将渗透控制单元置于恒温环境内,且恒温环境内的温度与三个温度传感器监测的温度相同,直到第一高压注入泵48、第二高压注入泵49、第一容器50及第二容器51的温度与恒温环境内的温度保持一致,实验过程整个室内温度保持不变,此时完成地层温度环境的模拟;

[0086] 步骤④:设置围压泵33压力为 σ_{c1} ,打开第三截止阀V3,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第二稳压阀W2的压力值为 σ_{c1} ,使围压加载腔7保持在指定压力值 σ_{c1} ,为页岩试样提供围压 σ_{c1} ;设置轴压泵32压力 σ_{d1} ,打开第二截止阀V2,开始对页岩试样加压,压力稳定后,调节第一稳压阀W1的压力值为 σ_{d1} ,使轴压加载腔6保持在指定压力值 σ_{d1} ,为页岩试样提供轴压 σ_{d1} ;此时完成地应力的模拟;

[0087] 步骤四:水力压裂

[0088] 步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,采用定压压裂方式或定流量压裂方式;当采用定压压裂方式时,首先打开第八截止阀V8和第九截止阀V9,压裂液由第一储液罐39流出,先经第一压裂泵37增压,再依次经第一减压阀R1和水力压裂管25后以设定压力流入页岩试样9的水力压裂孔24内,直至完成页岩试样9的水力压裂;当采用定流量压裂方式时,首先打开第十截止阀V10和第十一截止阀V11,压裂液由第二储液罐40流出,先经第二压裂泵38增压,再直接通过水力压裂管25后以设定流量流入页岩试样9的水力压裂孔24内,直至完成页岩试样9的水力压裂;

[0089] 步骤②:当页岩试样9完成水力压裂后,打开第十二截止阀V12,将压裂液卸压回收至废液回收罐41内;

[0090] 步骤五:微波致裂

[0091] 步骤①:在轴压和围压保持不变的情况下,调节第一单向阀C1数值为 σ_{d1} ,调节第二单向阀C2数值为 σ_{c1} ,首先打开围压与轴压控制单元的第六截止阀V6和第七截止阀V7,同时打开渗透控制单元的第二十截止阀V20和第二十五截止阀V25,然后启动微波发生器22,进而通过微波发射探头21向页岩试样9输入微波辐射,进而使页岩试样9内部产生高温以实现致裂作用,此时页岩试样9会因微波作用产生气体,而气体的产生会导致压力变化,而该压力变化则通过第六压力传感器54进行实时监测,同时页岩试样9温度则由第一温度传感器18进行实时监测,如果温度超过设定值,则立即启动高低温循环一体机15,进而通过螺旋冷

却盘管14对页岩试样9进行降温,防止温度过高造成热缩套管13变形和油温过高损坏元件;在对页岩试样9进行微波致裂过程中,因受热造成的油压升高,会触发第一单向阀C1和第二单向阀C2开启,使多出的液压油流回到油箱内部,从而维持围压和轴压的恒定;

[0092] 步骤②:当微波致裂达到设定时间后,关闭微波发生器22,之后当第一温度传感器18所监测的温度值低于地层温度环境模拟下的温度设定值后,关闭高低温循环一体机15;当第六压力传感器54所监测的压力值不再变化时,说明页岩试样9内不再产生气体;之后关闭第六截止阀V6和第七截止阀V7,最后再次启动线圈式加热器17对页岩试样9进行加热,直到第一温度传感器18、第二温度传感器19及第三温度传感器20监测的温度均重新达到设定值;

[0093] 步骤③:打开第二十九截止阀V29,将管路中的气体导入气象色谱仪53中,之后立即关闭第二十九截止阀V29,通过气象色谱仪53对管路中的气体成分和含量进行分析;最后将装置内的所有截止阀均调整为关闭状态;

[0094] 步骤六:试样渗透率测量

[0095] 步骤①:将第十三截止阀V13、第十四截止阀V14、第十五截止阀V15、第十七截止阀V17、第十八截止阀V18、第十九截止阀V19、第二十截止阀V20、第二十一截止阀V21、第二十二截止阀V22、第二十三截止阀V23、第二十四截止阀V24调整为开启状态,将渗透控制单元内的其他所有截止阀均调整为关闭状态,之后启动真空泵52,将下多孔垫片10、上多孔垫片11、上渗流通气管26、下渗流通气管27以及渗透控制单元内的所有连通管路内的气体抽离,直到真空度达到0.05Pa时,打开第二十五截止阀V25、第二十六截止阀V26、第二十七截止阀V27、第二十八截止阀V28,抽真空15秒,之后关闭第二十三截止阀V23和第二十四截止阀V24,最后关停真空泵52;

[0096] 步骤②:先关闭第二十截止阀V20和第二十二截止阀V22,然后调节第二减压阀R2使压力达到设定压力 P_1 ,之后打开高压气瓶47,在设定压力 P_1 下将第一高压注入泵48、第二高压注入泵49、第一容器50及第二容器51内充满渗透测试气体,之后关闭第十三截止阀V13、第十四截止阀V14和第十五截止阀V15,运行第一高压注入泵48和第二高压注入泵49,使渗透控制单元内的压力达到设定压力 P_1 且保持恒定;

[0097] 步骤③:打开第二十截止阀V20和第二十二截止阀V22,通过第一高压注入泵48、第二高压注入泵49同步以设定压力 P_1 向页岩试样9内注入渗透测试气体,直到压差传感器56的读数为零时结束,之后关闭第二十截止阀V20和第二十二截止阀V22;

[0098] 步骤④:先关闭第十七截止阀V17,使上渗透控制单元变为定容状态,然后升高第二高压注入泵49至设定压力 P_2 ,待压力稳定后,再关闭第十八截止阀V18,使下渗透控制单元变为定容状态,并记录下此时第七压力传感器55的读数,并将该压力读数记为 P_0 ,同时将此刻记为 T_0 ;

[0099] 步骤⑤:打开第二十截止阀V20和第二十二截止阀V22,渗透测试气体开始进入页岩试样9内进行渗透,直到压差传感器56的读数稳定后,记录下此时第七压力传感器55的读数,并将该压力读数记为 P_n ,同时将此刻记为 T_n ;最后按照如下公式计算页岩试样9的渗透率;

$$[0100] \quad K = -\frac{\ln P_n - \ln P_0}{T_n - T_0} \cdot \frac{C\mu L}{A \left(\frac{1}{V_d} + \frac{1}{V_u} \right)}$$

[0101] 式中,K为渗透率, P_n 为渗透结束后下渗端压力, P_0 为渗透开始前下渗端压力, T_n 为渗透结束时刻, T_0 为渗透起始时刻,C为渗透测试气体压缩系数, μ 为渗透测试气体粘度,L为页岩试样轴向高度,A为页岩试样横截面积, V_d 为下渗透参考体积, V_u 为上渗透参考体积。

[0102] 步骤⑥:将渗透控制单元内的第十六截止阀V16调整为开启状态,将渗透控制单元内的气体通过第十六截止阀V16放掉,之后将渗透控制单元内的所有截止阀调整为关闭状态;

[0103] 步骤⑦:打开第一截止阀V1,启动空压机31对腔室内进行排油,待油排空后关闭第一截止阀V1和空压机31,用千斤顶加压后拧下下部承压台2上的螺栓,使下部承压台2与压力室壳体1分离,最后拆除传感器、页岩试样等元件。

[0104] 上述步骤六可以在模拟地应力和地层温度环境完成后,进行原始渗透率测试,此外,上述步骤六也可以在每个水力压裂与微波试验步骤后均进行渗透率测定,从而测定页岩试样9致裂前后渗透率的变化。

[0105] 此外,可以通过改变实验中的轴压、围压和温度,用以模拟不同埋深条件下的地应力和地层温度环境,同时也可以调整气体注入压力以及水力压裂和微波致裂的具体参数,以获取不同实验条件下的页岩试样9的渗透性能,最终可以得到不同实验条件下的水力压裂和微波致裂联合增透页岩的作用效果。再有,还可以通过调整水力压裂与微波致裂的顺序,即先进行微波致裂,再进行水力压裂,可进行多次压裂与微波致裂试验,进一步探究水力压裂与微波致裂联合增透页岩的机理。

[0106] 实施例中的方案并非用以限制本发明的专利保护范围,凡未脱离本发明所为的等效实施或变更,均包含于本案的专利范围中。

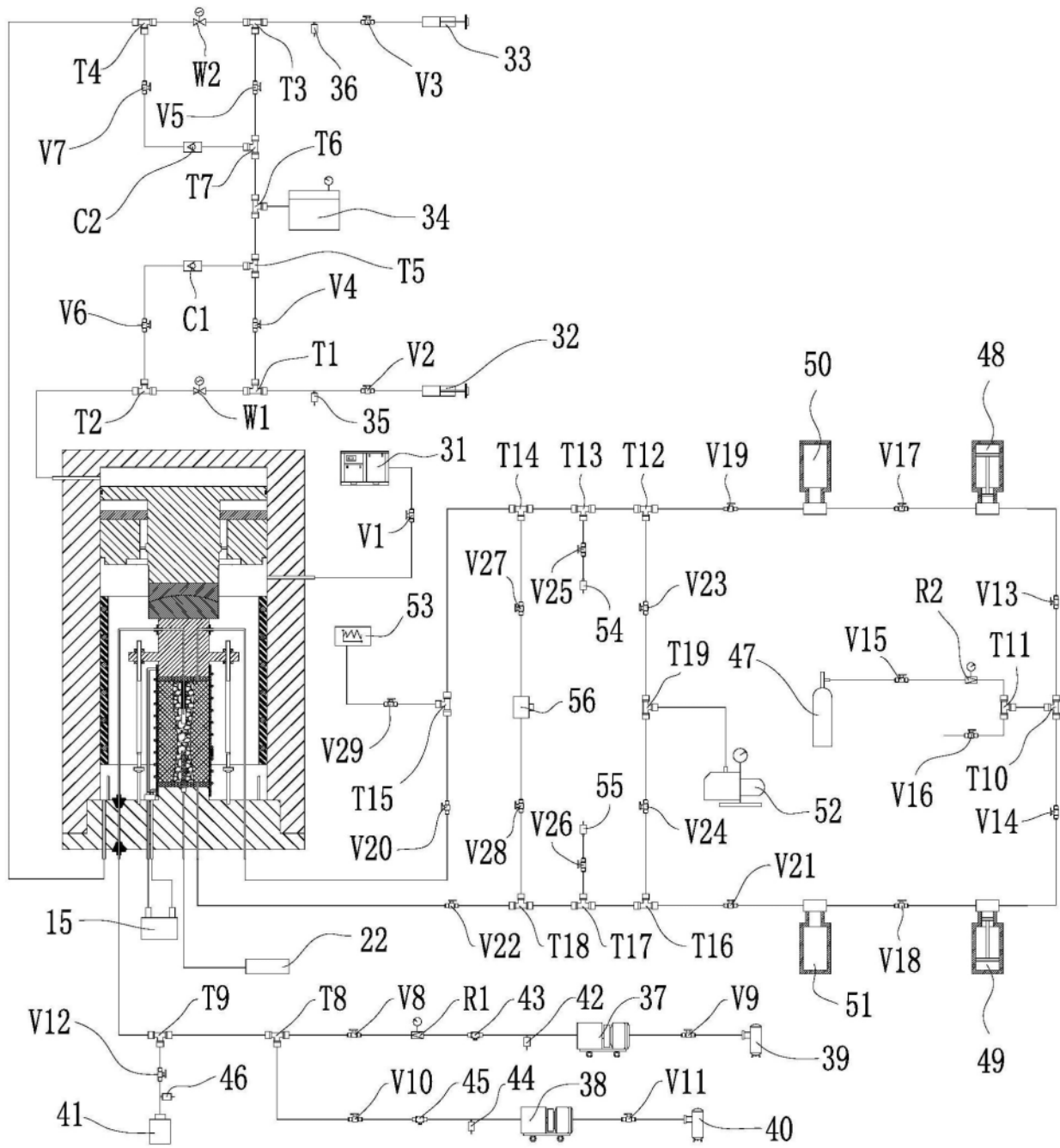


图1

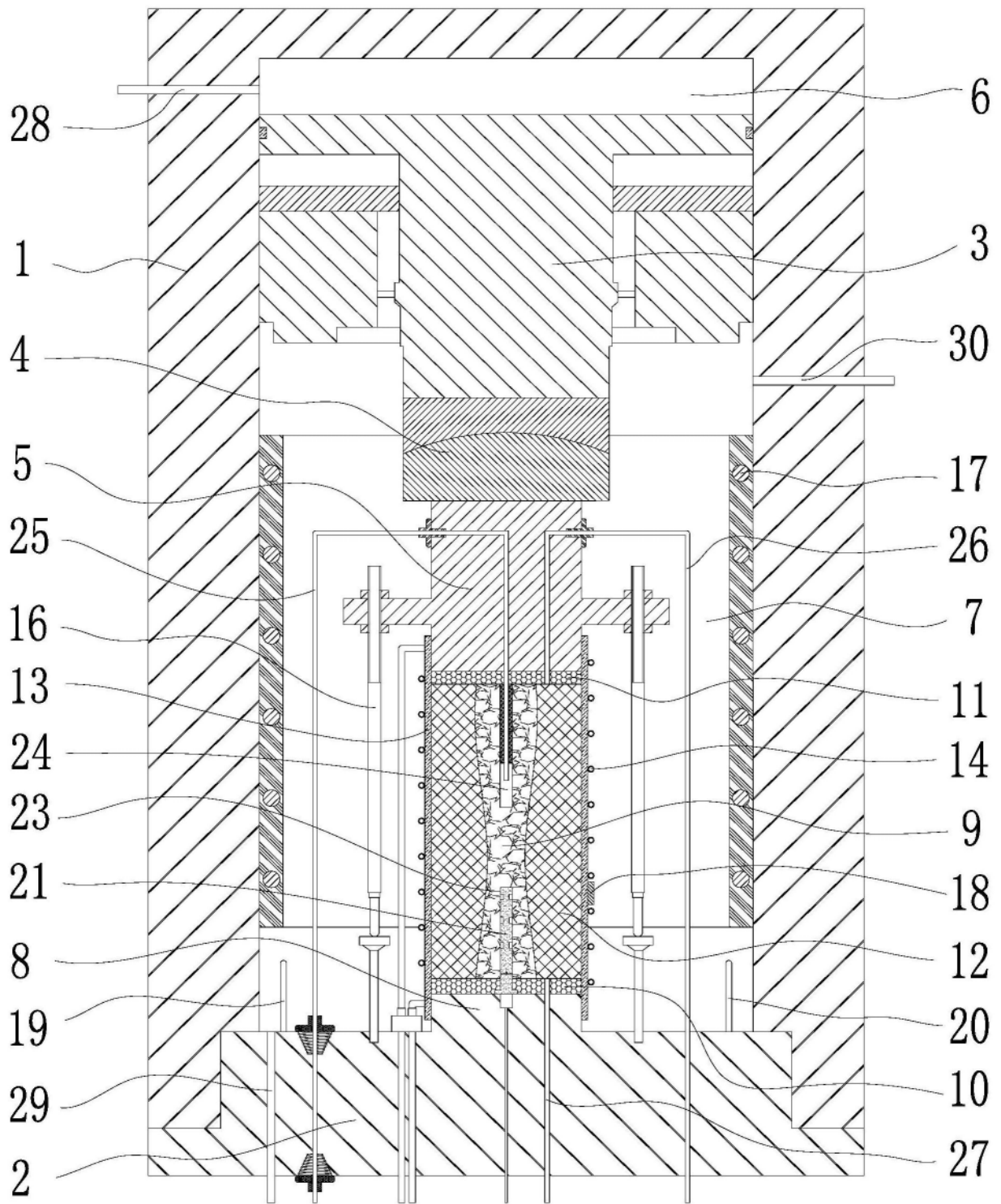


图2