



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107506534 A

(43)申请公布日 2017.12.22

(21)申请号 201710659794.6

(22)申请日 2017.08.04

(71)申请人 陕西延长石油(集团)有限责任公司

地址 710000 陕西省西安市科技二路75号

(72)发明人 庞振宇 王香增 赵习森 江绍静

党海龙 黄春霞 畅斌 倪军

王成俊 时丕同 蔺建武

(74)专利代理机构 西安亿诺专利代理有限公司

61220

代理人 贺珊

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

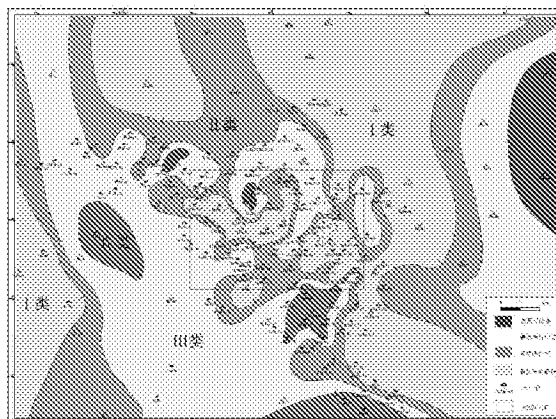
权利要求书3页 说明书9页 附图1页

## (54)发明名称

一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法

## (57)摘要

一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,属于二氧化碳驱油工艺领域,其特征在于包括如下步骤:1)建立二氧化碳地质封存体测井响应模型;2)确定区域盖层、直接盖层以及储层内部的隔夹层;3)编制盖层平面分布图,确定盖层平面分布特征参数;4)计算盖层中各相态二氧化碳的渗流速度,建立渗滤综合评价参数;5)建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型;6)对盖层中不同化学物质的反应过程进行数值模拟,确定不同类型盖层的抗侵蚀性;7)建立油田二氧化碳驱油封存中盖层封闭性的评价指标;从而对盖层封闭能力进行综合评价。本发明所述方法针对盖层开展了多因素、立体式的综合评价,极大提高了对盖层封闭能力评价的精度。



1. 一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,其特征在于包括如下步骤:

- 1) 建立二氧化碳地质封存体测井响应模型,识别有效盖层;
- 2) 确定区域盖层、直接盖层以及储层内部的隔夹层,总结盖层宏观封闭特征参数;
- 3) 编制盖层平面分布图,确定盖层平面分布特征参数;
- 4) 计算盖层中各相态二氧化碳的渗流速度,建立渗滤综合评价参数,对盖层中各相态二氧化碳的渗流速度及封闭能力进行安全性评价;

5) 建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型,优选影响盖层微观封闭性能的特征参数;

6) 通过高温高压反应釜实验,分析盖层中二氧化碳-水-岩石的地球化学反应,利用 Toughreact 模拟软件,对盖层中不同化学物质的反应过程进行数值模拟,研究盖层中不同黏土矿物组合类型对盖层的溶蚀与自封闭效应的影响,确定不同类型盖层的抗侵蚀性;

7) 通过上述步骤,依据油田的实际测井数据、岩心分析数据,选取影响盖层封闭能力的特征参数,建立油田二氧化碳驱油封存中盖层封闭性的评价指标;指标建立好之后,将其他区块的数据与指标进行对比,从而对盖层封闭能力进行综合评价。

2. 根据权利要求1所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,其特征在于:步骤4) 所述各相态二氧化碳包括游离相二氧化碳、水溶相二氧化碳和扩散相二氧化碳。

3. 根据权利要求2所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,其特征在于:步骤4) 所述各相态二氧化碳的渗流速度及封闭能力进行安全性评价方式如下:

a、盖层对游离相二氧化碳封闭能力的评价方法:根据改进后的达西定律,游离相二氧化碳在差  $(P_1-P_2)$  作用下于  $t$  时间内通过面积为  $S$  的盖层的渗滤运移量  $(Q_s)$  为:

$$Q_s = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu_g H}$$

为了研究问题方便,假设对一个盆地所有的泥岩盖层施加一个同样大小的压力  $F$ ,游离相二氧化碳在通过其渗滤运移;由上式便可得到一个假设的游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗流速度  $(V_s)$ ,单位时间通过单位面积的二氧化碳渗滤量)即:

$$V_s = \frac{K(F - f)}{\mu_g H}$$

式中: $H$ 为泥岩盖层厚度,单位:m;

$Q_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤量,单位: $m^3$ ;

$V_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤速度,单位: $m/s$ ;

$K$ 为泥岩盖层岩石的综合渗透率,单位: $mD$ ;

$P_1$ 为驱使游离相二氧化碳通过泥岩盖层进行渗滤运移的压力,单位: $Pa$ ;

$P_2$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤运移时遇到的阻力,单位: $Pa$ ;

$\mu_g$ 为游离相二氧化碳流动粘度,单位: $Pa \cdot s$ ;

b、盖层对水溶相二氧化碳封闭能力的评价方法:水溶相二氧化碳在压力差  $(P_1-P_2)$  的作用下通过泥岩盖层发生渗滤运移散失,其渗滤散失的水溶相二氧化碳量  $(Q_w)$  可用达西定律

来表示:

$$Q_w = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu_w} C_g$$

式中的  $(P_1 - P_2)$ ,  $S$ ,  $t$  在实际地质条件下均属于难以确定的参数, 因此为了表示水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的难易程度, 可改写为水溶相二氧化碳在单位压差作用下于单位时间内通过单位面积泥岩盖层的渗滤运移速度 ( $V_w$ ):

$$V_w = \frac{K}{\mu_w H} C_g$$

式中:  $H$  为泥岩盖层厚度, 单位:  $m$ ;

$Q_w$  为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤散失的水溶气量, 单位:  $m^3$ ;

$V_w$  为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤运移速度, 单位:  $m/s$ ;

$C_g$  为二氧化碳在水中的溶解度, 单位:  $m^3/m^3$ ;

$\mu_w$  为地层水粘度, 单位:  $Pa \cdot s$ ;

c. 盖层对扩散相二氧化碳封闭能力的评价方法: 由费克定律, 二氧化碳在浓度差  $C - C_0$  作用下于  $t$  时间内通过厚度为  $H$ 、面积为  $S$  的泥岩盖层的扩散损失量 ( $Q_d$ ) 为:

$$Q_d = D \cdot \frac{(C - C_0)}{H} \cdot S \cdot t$$

同理, 假设给一个盆地所用的泥岩盖层施加一个同样大小的浓度  $C$ , 让二氧化碳通过其进行扩散运移; 在这种情况下, 由上式可以得到一个假设的二氧化碳通过泥岩盖层扩散速度 ( $V_d$ ) 的大小, 即:

$$V_d = \frac{D(C - C_0)}{H}$$

式中:  $H$  为泥岩盖层厚度, 单位:  $m$ ;

$D$  为泥岩盖层二氧化碳的综合扩散系数;

$Q_d$  为二氧化碳扩散损失量, 单位:  $m$ ;

$V_d$  为二氧化碳通过泥岩盖层的扩散速度, 单位:  $m/s$ ;

$C$  为下伏气层孔隙水中二氧化碳浓度, 单位:  $m^3/m^3$ ;

$C_0$  为泥岩盖层孔隙水中天然气浓度, 单位:  $m^3/m^3$ ;

d. 建立盖层对各种相态二氧化碳封闭能力的综合评价参数  $V$ :

$$V = a_s V_s + a_w V_w + a_d V_d$$

式中  $a_s, a_w, a_d$  为盖层对各种相态二氧化碳封闭能力评价的权重系数。

4. 根据权利要求3所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法, 其特征在于: 步骤5) 所述建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型, 优选影响盖层微观封闭性能的特征参数的具体过程如下: 以排替压力实验、物性分析实验为手段, 测井资料为基础, 对泥岩盖层孔隙度、泥岩埋深与排替压力测试值进行多元回归, 建立孔隙度

与排替压力拟合模型;高压压汞实验根据平行毛细管束原理来分析孔喉结构,通过记录不同进汞压力下注入的非润湿相汞的含量,得出相应的孔隙半径分布;进行恒速压汞实验,定量表征孔隙和喉道的大小、形态、空间配置关系,定量表征喉道半径平均值,最大连通喉道半径、单位体积有效孔隙体积、单位体积有效喉道体积、孔喉半径比、孔喉体积比;以恒速压汞实验、物性分析实验为手段,测井资料为基础,对泥岩盖层渗透率与喉道半径测试值进行多元回归,建立渗透率与喉道半径平均值拟合模型,模型如下:

$$R = AK^B$$

式中,R为喉道半径平均值,单位: $\mu\text{m}$ ;

K为渗透率,单位: $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;

A和B为渗透率与喉道半径线性拟合的相关系数;

总结出盖层综合评价指标E的计算公式,对公式各参数采用均值法进行无量纲化;公式如下:

$$E = \frac{hr_m P_0 S_o}{Zk}$$

式中,E为盖层封闭能力综合评价指标;

h为泥质岩累积厚度,单位:m;

$r_m$ 为泥地比,即泥岩累积厚度/地层厚度;

$P_0$ 为盖层排替压力,单位:MPa;

$S_o$ 为盖层下部储层现今含油饱和度,单位:%;

k为油藏压力系数,为实测地层压力/静水压力;

Z为油藏埋深,以储层段主力砂体顶面为准;

由流体压力增加造成的盖层破裂过程称为盖层的水力破裂,水力破裂的临界孔隙流体压力条件为:

$$P = \sigma_3 + T$$

式中:P 为流体压力,单位:MPa;

$\sigma_3$ 为最小主应力,单位:MPa;

T 为抗张强度,单位:MPa;

最小主应力与抗张强度可通过三轴力学实验获得。

## 一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于二氧化碳驱油工艺领域,尤其涉及一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法。

### 背景技术

[0002] 截止目前,国内特低渗储层二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价尚且不足,仅考虑了游离相二氧化碳的逃逸,对扩散相和水溶相二氧化碳逃逸方面的研究较少且不够深入。喉道是影响特低渗储、盖层微观渗流的关键因素,然而目前的研究也仅仅停留在孔隙分析的层面,并没有将孔隙与喉道区分开,深入研究喉道对盖层封闭性的影响。

### 发明内容

[0003] 本发明旨在解决上述问题,提供一种二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法。

[0004] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,包括如下步骤:

- 1) 建立二氧化碳地质封存体测井响应模型,识别有效盖层;
- 2) 确定区域盖层、直接盖层以及储层内部的隔夹层,总结盖层宏观封闭特征参数;
- 3) 编制盖层平面分布图,确定盖层平面分布特征参数;
- 4) 计算盖层中各相态二氧化碳的渗流速度,建立渗滤综合评价参数,对盖层中各相态二氧化碳的渗流速度及封闭能力进行安全性评价;

5) 建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型,优选影响盖层微观封闭性能的特征参数;

6) 通过高温高压反应釜实验,分析盖层中二氧化碳-水-岩石的地球化学反应,利用 Toughreact 模拟软件,对盖层中不同化学物质的反应过程进行数值模拟,研究盖层中不同黏土矿物组合类型对盖层的溶蚀与自封闭效应的影响,确定不同类型盖层的抗侵蚀性;

7) 通过上述步骤,依据油田的实际测井数据、岩心分析数据,选取影响盖层封闭能力的特征参数,建立油田二氧化碳驱油封存中盖层封闭性的评价指标;指标建立好之后,将其他区块的数据与指标进行对比,从而对盖层封闭能力进行综合评价。

[0005] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,步骤4)所述各相态二氧化碳包括游离相二氧化碳、水溶相二氧化碳和扩散相二氧化碳。

[0006] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,步骤4)所述各相态二氧化碳的渗流速度及封闭能力进行安全性评价方式如下:

a、盖层对游离相二氧化碳封闭能力的评价方法:根据改进后的达西定律,游离相二氧化碳在差 $(P_1-P_2)$ 作用下于 $t$ 时间内通过面积为 $S$ 的盖层的渗滤运移量 $(Q_s)$ 为:

$$Q_s = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu H}$$

为了研究问题方便,假设对一个盆地所有的泥岩盖层施加一个同样大小的压力 $F$ ,游离

相二氧化碳在通过其渗滤运移;由上式便可得到一个假设的游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗流速度 ( $V_s$ ,单位时间通过单位面积的二氧化碳渗滤量)即:

$$V_s = \frac{K(F-f)}{\mu H}$$

式中:H为泥岩盖层厚度,单位:m;

$Q_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤量,单位: $m^3$ ;

$V_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤速度,单位:m/s;

K为泥岩盖层岩石的综合渗透率,单位:mD;

$P_1$ 为驱使游离相二氧化碳通过泥岩盖层进行渗滤运移的压力,单位:Pa;

$P_2$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤运移时遇到的阻力,单位:Pa;

$\mu_g$ 为游离相二氧化碳流动粘度,单位:Pa·s;

b、盖层对水溶相二氧化碳封闭能力的评价方法:水溶相二氧化碳在压力差 ( $P_1-P_2$ ) 的作用下通过泥岩盖层发生渗滤运移散失,其渗滤散失的水溶相二氧化碳量 ( $Q_w$ ) 可用达西定律来表示:

$$Q_w = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu_w} C_g$$

式中的 ( $P_1-P_2$ ), S, t在实际地质条件下均属于难以确定的参数,因此为了表示水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的难易程度,可改写为水溶相二氧化碳在单位压差作用下于单位时间内通过单位面积泥岩盖层的渗滤运移速度 ( $V_w$ ):

$$V_w = \frac{K}{\mu_w H} C_g$$

式中:H为泥岩盖层厚度,单位:m;

$Q_w$ 为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤散失的水溶气量,单位: $m^3$ ;

$V_w$ 为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤运移速度,单位:m/s;

$C_g$ 为二氧化碳在水中的溶解度,单位: $m^3/m^3$ ;

$\mu_w$ 为地层水粘度,单位:Pa·s;

c、盖层对扩散相二氧化碳封闭能力的评价方法:由费克定律,二氧化碳在浓度差  $C-C_0$  作用下于t时间内通过厚度为H、面积为S的泥岩盖层的扩散损失量 ( $Q_d$ ) 为:

$$Q_d = D \cdot \frac{(C - C_0)}{H} \cdot S \cdot t$$

同理,假设给一个盆地所用的泥岩盖层施加一个同样大小的浓度C,让二氧化碳通过其进行扩散运移;在这种情况下,由上式可以得到一个假设的二氧化碳通过泥岩盖层扩散速度 ( $V_d$ ) 的大小,即:

$$V_d = \frac{D(C - C_0)}{H}$$

式中:H为泥岩盖层厚度,单位:m;

D为泥岩盖层二氧化碳的综合扩散系数；

$Q_d$ 为二氧化碳扩散损失量,单位:m;

$V_d$ 为二氧化碳通过泥岩盖层的扩散速度,单位:m/s;

C为下伏气层孔隙水中二氧化碳浓度,单位: $m^3/m^3$ ;

$C_0$ 为泥岩盖层孔隙水中天然气浓度,单位: $m^3/m^3$ ;

d. 建立盖层对各种相态二氧化碳封闭能力的综合评价参数V:

$$V = a_s V_s + a_w V_w + a_d V_d$$

式中 $a_s, a_w, a_d$ 为盖层对各种相态二氧化碳封闭能力评价的权重系数,权重系数依据盖层对各种相态二氧化碳封闭能力贡献大小来确定。

[0007] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,步骤5)所述建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型,优选影响盖层微观封闭性能的特征参数的具体过程如下:以排替压力实验、物性分析实验为手段,测井资料为基础,对泥岩盖层孔隙度、泥岩埋深与排替压力测试值进行多元回归,建立孔隙度与排替压力拟合模型;高压压汞实验根据平行毛细管束原理来分析孔喉结构,通过记录不同进汞压力下注入的非润湿相汞的含量,得出相应的孔隙半径分布;进行恒速压汞实验,定量表征孔隙和喉道的大小、形态、空间配置关系,定量表征喉道半径平均值,最大连通喉道半径、单位体积有效孔隙体积、单位体积有效喉道体积、孔喉半径比、孔喉体积比;以恒速压汞实验、物性分析实验为手段,测井资料为基础,对泥岩盖层渗透率与喉道半径测试值进行多元回归,建立渗透率与喉道半径平均值拟合模型,模型如下:

$$R = AK^B$$

式中,R为喉道半径平均值,单位: $\mu m$ ;

K为渗透率,单位: $10^{-3} \mu m^2$ ;

A和B为渗透率与喉道半径线性拟合的相关系数;

总结出盖层综合评价指标E的计算公式,对公式各参数采用均值法进行无量纲化;公式如下:

$$E = \frac{hr_m P_0 S_0}{Zk}$$

式中,E为盖层封闭能力综合评价指标;

h为泥质岩累积厚度,单位:m;

$r_m$ 为泥地比,即泥岩累积厚度/地层厚度;

$P_0$ 为盖层排替压力,单位:MPa;

$S_0$ 为盖层下部储层现今含油饱和度,单位:%;

k为油藏压力系数,为实测地层压力/静水压力;

Z为油藏埋深,以储层段主力砂体顶面为准;

由流体压力增加造成的盖层破裂过程称为盖层的水力破裂,水力破裂的临界孔隙流体压力条件为:

$$P = \sigma_3 + T$$

式中:P为流体压力,单位:MPa;

$\sigma_3$ 为最小主应力,单位:MPa;

T为抗张强度,单位:MPa;

最小主应力与抗张强度可通过三轴力学实验获得。

[0008] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,通过以地质资料、测井资料、岩心分析资料为基础,采用恒速压汞、核磁共振、排替压力、三轴应力实验、高温高压反应釜等实验为手段,从宏观与微观两方面系统从二氧化碳三种相态对盖层封闭性进行评价。由单一的游离相封闭评价转化到游离、水溶、扩散三种相态的综合封闭评价;由孔隙尺度的封闭描述进化到更微观的喉道尺度的封闭定量表征;首次评价盖层产生水力破裂的条件;综合评价盖层中不同黏土矿物组合类型对盖层的溶蚀与自封闭效应的影响,确定不同类型盖层的抗侵蚀性;本发明所述方法针对盖层开展了多因素、立体式的综合评价,极大提高了对盖层封闭能力评价的精度。

## 附图说明

[0009] 图1为本发明所述盖层的封闭能力等级分布示意图。

## 具体实施方式

[0010] 下面通过实施例对本发明所述二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法进行详细说明。

[0011] 本发明所述的二氧化碳驱油封存中盖层封闭性评价方法,包括如下步骤:

1) 建立二氧化碳地质封存体测井响应模型,识别有效盖层;

在地层划分与对比、构造特征、沉积特征、成岩特征研究的基础上,将测井资料、录井资料与岩心分析资料(包括三轴应力实验、突破压力实验、高压压汞实验、物性分析、岩电实验、铸体薄片、粒度分析,全岩分析实验)相结合,识别有效盖层。当突破压力>地层剩余压力(剩余压力=地层压力-静水压力)时,可识别为有效盖层。将重点测井曲线进行标准化、归一化处理,与物性分析和岩电实验相结合建立孔隙度、渗透率和含油饱和度模型,再与地质标志(包括岩石类型、成分,结构、物性、沉积微相类型)相结合,建立盖层测井相应评价标准。

[0012] 2) 确定区域盖层、直接盖层以及储层内部的隔夹层,总结盖层宏观封闭特征参数。

[0013] 立足于盖层的岩相、发育规模、厚度以及沉积环境,以测井资料和岩心分析资料为基础,识别、划分区域盖层,直接盖层及储层内部隔夹层。确定泥岩的分布范围、泥岩厚度、泥地比和隔夹层的测井相应标准,总结影响盖层宏观封闭的特征参数。

[0014] 3) 编制盖层平面分布图,确定盖层平面分布特征参数。

[0015] 4) 计算盖层中各相态二氧化碳的渗流速度,建立渗滤综合评价参数,对盖层中各相态二氧化碳的渗流速度及封闭能力进行安全性评价。

[0016] 盖层对游离相二氧化碳封闭机理:泥岩盖层对游离相二氧化碳封闭主要是毛细管直接封闭和异常孔隙流体压力的间接封闭,毛细管封闭游离相二氧化碳的实质是泥岩盖层的排替压力大于或等于游离相二氧化碳的能量,即可对游离相二氧化碳形成封闭,否则游



离相二氧化碳将通过泥岩盖层发生渗滤散失。

[0017] 盖层对游离相二氧化碳封闭能力的评价方法:根据改进后的达西定律,游离相二氧化碳在差( $P_1-P_2$ )作用下于t时间内通过面积为S的盖层的渗滤运移量( $Q_s$ )为:

$$Q_s = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu H}$$

为了研究问题方便,假设对一个盆地所有的泥岩盖层施加一个同样大小的压力F,游离相二氧化碳在通过其渗滤运移;由上式便可得到一个假设的游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗流速度( $V_s$ ,单位时间通过单位面积的二氧化碳渗滤量)即:

$$V_s = \frac{K(F - f)}{\mu H}$$

式中:H为泥岩盖层厚度,单位:m;

$Q_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤量,单位: $m^3$ ;

$V_s$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤速度,单位:m/s;

K为泥岩盖层岩石的综合渗透率,单位:mD;

$P_1$ 为驱使游离相二氧化碳通过泥岩盖层进行渗滤运移的压力,单位:Pa;

$P_2$ 为游离相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤运移时遇到的阻力,单位:Pa;

$\mu$ 为游离相二氧化碳流动粘度,单位:Pa·s;

$V_s$ 大小既可以反映泥岩本身特征(K, $P_2$ ,H)对游离相二氧化碳封闭能力的影响,又可以反映二氧化碳性质( $\mu$ )对游离相二氧化碳封闭能力的影响,是反映泥岩盖层对游离相二氧化碳封闭能力的一个综合评价指标。 $V_s$ 值越小,表明游离相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤速度越慢,泥岩对游离相二氧化碳封闭能力越强;反之则越弱。

[0018] 盖层对水溶相二氧化碳封闭机理:水溶相二氧化碳不同于游离相二氧化碳,它在地下是随水一同存在运移的。泥岩盖层对水溶相二氧化碳的封闭,实际上是对水的封闭。而水通过泥岩盖层孔隙运移时,不存在毛细管力的阻挡,主要是通过泥岩盖层中粘土矿物颗粒对水的吸附作用来阻止水溶相二氧化碳的运移。泥岩盖层吸附阻力越大,对水溶相二氧化碳的封闭能力越强;反之则越弱。

[0019] 泥岩盖层对水溶相二氧化碳封闭能力强弱主要取决于其内粘土矿物颗粒对水吸附阻力的大小。由于受岩石孔隙结构、粘土矿物成分和含量及压实成岩程度等多种因素的影响,靠目前研究水平难以给出泥岩盖层吸附阻力的确切大小和准确表达。但泥岩盖层对水的吸附阻力主要与其渗透性和厚度大小有关。

[0020] 盖层对水溶相二氧化碳封闭能力的评价方法:水溶相二氧化碳在压力差( $P_1-P_2$ )的作用下通过泥岩盖层发生渗滤运移散失,其渗滤散失的水溶相二氧化碳量( $Q_w$ )可用达西定律来表示:

$$Q_w = \frac{K(P_1 - P_2)St}{\mu_w} C_g$$

式中的  $(P_1-P_2)$ ,  $S$ ,  $t$  在实际地质条件下均属于难以确定的参数, 因此为了表示水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的难易程度, 可改写为水溶相二氧化碳在单位压差作用下于单位时间内通过单位面积泥岩盖层的渗滤运移速度 ( $V_w$ ):

$$V_w = \frac{K}{\mu_w H} C_g$$

式中:  $H$  为泥岩盖层厚度, 单位:  $m$ ;

$Q_w$  为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层渗滤散失的水溶气量, 单位:  $m^3$ ;

$V_w$  为水溶相二氧化碳通过泥岩盖层的渗滤运移速度, 单位:  $m/s$ ;

$C_g$  为二氧化碳在水中的溶解度, 单位:  $m^3/m^3$ ;

$\mu_w$  为地层水粘度, 单位:  $Pa \cdot s$ ;

$V_w$  的大小既可以反映泥岩盖层本身特征 ( $K, H$ ) 对水溶相二氧化碳封闭能力的影响, 又可以反映受二氧化碳影响的地层水性质 ( $\mu_w$ ) 和二氧化碳在水中溶解能力 ( $C_g$ ) 对水溶相二氧化碳封闭能力的影响。 $V_w$  越小, 表明泥岩盖层对水溶相二氧化碳的封闭能力越强; 反之则越弱。

[0021] 盖层对扩散相二氧化碳封闭机理: 具有生烃能力的泥岩盖层, 才能对扩散相二氧化碳形成封闭作用。按照泥岩盖层内是否具有异常孔隙流体压力, 又可将泥岩盖层对扩散相二氧化碳的封闭作用细分为抑制浓度封闭作用和替代浓度封闭作用。抑制浓度封闭作用是由于泥岩盖层内具有异常孔隙流体压力, 其生成的天然气溶于孔隙水中形成了较正常压实地层异常高的含气浓度, 在此处形成向下递减的含气浓度梯度, 天然气在此浓度梯度的作用下向下扩散, 抑制了下伏扩散相二氧化碳向上扩散而形成的封闭作用; 替代浓度封闭作用是由于其内不存在异常孔隙流体压力, 不能形成较正常压实地层异常高的含气浓度, 仍为向上递减的含气浓度, 天然气在此浓度梯度的作用下仍向地表方向发生扩散运移, 但由于盖层本身生成的天然气向上扩散运移, 就代替了下伏扩散相二氧化碳的向上扩散, 从而对下伏扩散相二氧化碳形成封闭作用。

[0022] 盖层对扩散相二氧化碳封闭能力的评价方法: 由费克定律, 二氧化碳在浓度差  $C-C_0$  作用下于  $t$  时间内通过厚度为  $H$ 、面积为  $S$  的泥岩盖层的扩散损失量 ( $Q_d$ ) 为:

$$Q_d = D \cdot \frac{(C - C_0)}{H} \cdot S \cdot t$$

同理, 假设给一个盆地所用的泥岩盖层施加一个同样大小的浓度  $C$ , 让二氧化碳通过其进行扩散运移; 在这种情况下, 由上式可以得到一个假设的二氧化碳通过泥岩盖层扩散速度 ( $V_d$ ) 的大小, 即:

$$V_d = \frac{D(C - C_0)}{H}$$

式中:  $H$  为泥岩盖层厚度, 单位:  $m$ ;

$D$  为泥岩盖层二氧化碳的综合扩散系数;

$Q_d$  为二氧化碳扩散损失量, 单位:  $m$ ;

$V_d$ 为二氧化碳通过泥岩盖层的扩散速度,单位:m/s;

$C$ 为下伏气层孔隙水中二氧化碳浓度,单位: $m^3/m^3$ ;

$C_0$ 为泥岩盖层孔隙水中天然气浓度,单位: $m^3/m^3$ ;

$V_d$ 大小既可以反映泥岩盖层本身特征(D,H)对扩散相二氧化碳封闭能力的影响,又可以反映二氧化碳在水中溶解能力( $C_0$ )对扩散相二氧化碳封闭能力的影响。 $V_d$ 值越小,表明泥岩盖层对扩散相二氧化碳封闭能力越强;反之则越弱。

[0023] 建立盖层泥岩盖层对各种相态二氧化碳封闭能力的综合评价参数 $V$ :

$$V = a_s V_s + a_w V_w + a_d V_d$$

式中 $a_s, a_w, a_d$ 为盖层对各种相态二氧化碳封闭能力评价的权重系数,权重系数依据盖层对各种相态二氧化碳封闭能力贡献大小来确定。

[0024] 5) 建立孔隙度与排替压力拟合模型、建立渗透率与喉道特征参数拟合模型,优选影响盖层微观封闭性能的特征参数;

以排替压力实验、物性分析实验为手段,测井资料为基础,对泥岩盖层孔隙度、泥岩埋深与排替压力测试值进行多元回归,建立孔隙度与排替压力拟合模型。高压压汞实验根据平行毛细管束原理来分析孔喉结构,通过记录不同进汞压力下注入的非润湿相汞的含量,得出相应的孔隙半径分布,然而此种实验,并不能精确的将孔隙和喉道区分开,而喉道又是影响特低渗储、盖层微观渗流的关键因素,所以为了提高特低渗储层与盖层描述的精细程度,引入恒速压汞实验,定量表征孔隙和喉道的大小、形态、空间配置关系,定量表征喉道半径平均值,最大连通喉道半径、单位体积有效孔隙体积、单位体积有效喉道体积、孔喉半径比、孔喉体积比等,有效的克服了常规压汞的局限性和不足,具体实现了对孔隙和喉道的分别定量表征。以恒速压汞实验、物性分析实验为手段,测井资料为基础,对泥岩盖层渗透率与喉道半径测试值进行多元回归,建立渗透率与喉道半径平均值拟合模型,模型如下:

$$R = AK^B$$

式中, $R$ 为喉道半径平均值,单位: $\mu m$ ;

$K$ 为渗透率,单位: $10^{-8} \mu m^2$ ;

$A$ 和 $B$ 为渗透率与喉道半径线性拟合的相关系数;

总结出盖层综合评价指标 $E$ 的计算公式,对公式各参数采用均值法进行无量纲化;公式如下:

$$E = \frac{hr_m P_0 S_0}{Zk}$$

式中, $E$ 为盖层封闭能力综合评价指标;

$h$ 为泥质岩累积厚度,单位:m;

$r_m$ 为泥地比,即泥岩累积厚度/地层厚度;

$P_0$ 为盖层排替压力,单位:MPa;

$S_0$ 为盖层下部储层现今含油饱和度,单位:%;

$k$ 为油藏压力系数,为实测地层压力/静水压力;

$Z$ 为油藏埋深,以储层段主力砂体顶面为准;

盖层位于储集层上方,能够阻止油气向上逸散的岩层,主要起封闭作用,封闭机理主要包括毛细管封闭和水力封闭两种,当盖层的毛细管排替压力非常高时,只有通过盖层破裂才能导致封闭的破坏,裂缝的形成类似于天然水力压裂,因此这类封闭称为水力封闭。相应地,由流体压力增加造成的盖层破裂过程称为盖层的水力破裂。许多地质学家在调查研究的基础

上得出水力破裂的临界孔隙流体压力条件为:

$$P = \sigma_3 + T$$

式中:P为流体压力,单位:MPa;

$\sigma_3$ 为最小主应力,单位:MPa;

T为抗张强度,单位:MPa;

最小主应力与抗张强度可通过三轴力学实验获得。

[0025] 6)通过高温高压反应釜实验,分析盖层中二氧化碳—水—岩石的地球化学反应,利用Toughreact模拟软件,对盖层中不同化学物质的反应过程进行数值模拟,研究盖层中不同黏土矿物组合类型对盖层的溶蚀与自封闭效应的影响,确定不同类型盖层的抗侵蚀性。我国的特低渗油田盖层中,常见的黏土矿物有:伊利石(I)、高岭石(K)、绿泥石(C)、蒙脱石(S)、伊利石/蒙脱石无序间层(S/I)、伊利石/蒙脱石有序间层(I/S)和绿泥石/蒙脱石不规则间层(C/S)。

[0026] 7)通过上述步骤1-6,依据油田的实际测井数据、岩心分析数据,选取影响盖层封闭能力的特征参数(见表1),建立油田二氧化碳驱油封存中盖层封闭性的评价指标;指标建立好之后,将其他区块的数据与指标进行对比,从而对盖层封闭能力进行综合评价,得出如图1所示的封闭能力等级分布示意图。

[0027] 经过对JB研究区盖层封闭能力综合评价各项指标的计算(见表1),盖层封闭能力综合评价指标E主要分布在2.2~3.2之间,其次为大于3.2,小于2.2的所占比重较少;泥岩厚度大,主要集中在20m以上,20m以下的泥岩少量分布;泥地比普遍大于0.55,渗透率低,小于0.5mD占90%以上;粘土矿物组合类型主要为伊利石、绿泥石组合和伊利石、绿泥石、蒙脱石组合;排替压力均大于6.3 MPa,最小主应力与抗张强度之和均大于22 MPa;喉道半径细小,主要分布在0.0098  $\mu\text{m}$ 以下;渗滤综合评价参数V均大于3;盖层下部储层含油饱和度较高均大于45%,主要集中在46%以上。综合评价JB研究区盖层等级以I类、II类为主,盖层封闭性良好。

[0028] 表1盖层封闭能力综合评价指标

盖层综合评价等级	I类	II类	III类	IV类
盖层封闭能力综合评价指数 E	E>3.2	2.2<E<3.2	1<E<2.2	E<1
泥岩厚度 (m)	25.91	21.49	16.92	11.14
泥地比	0.71	0.59	0.45	0.29
渗透率 (mD)	0.01	0.05	0.1	0.15
粘土矿物组合类型	伊利石 绿泥石	伊利石 绿泥石 蒙脱石	伊利石 绿泥石 高岭石	伊利石 绿泥石 高岭石 蒙脱石
排替压力 (MPa)	6.38	6.31	6.28	6.24
最小主应力与抗张强度之和 (MPa)	23.5	22.9	21.8	21.0
喉道半径 ( $\mu\text{m}$ )	0.0072	0.0098	0.018	0.035
渗流综合评价参数 V (m/s)	4.3	3.2	2.6	1.9
盖层下部储层含油饱和度 (%)	46.98	45.78	45.13	45.05

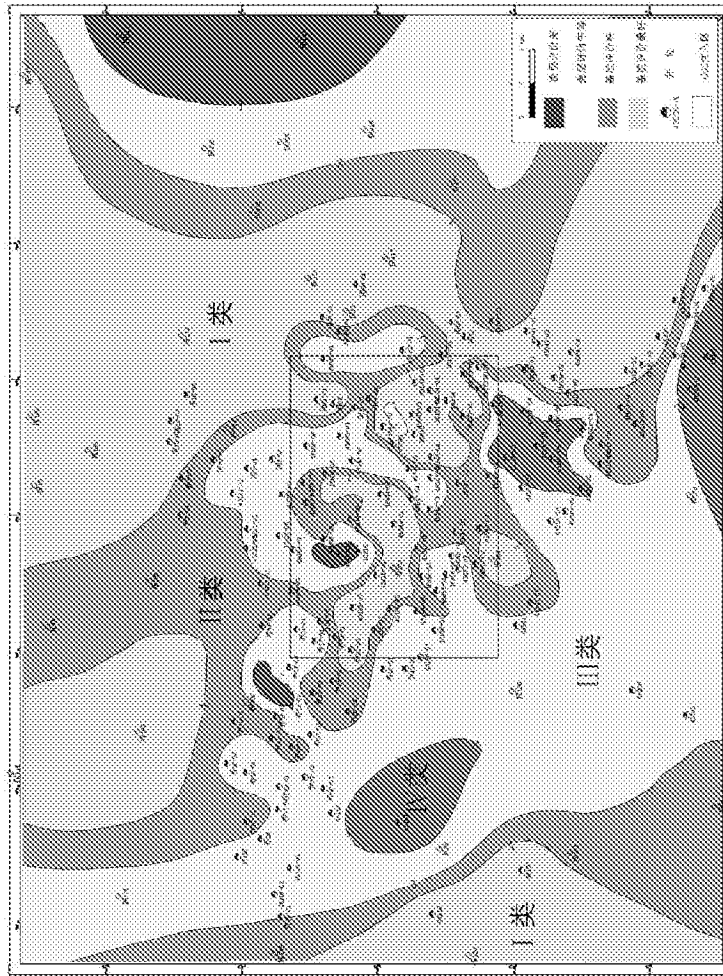


图1