



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109162686 A

(43)申请公布日 2019.01.08

(21)申请号 201810812785.0

(22)申请日 2018.07.23

(71)申请人 中国石油大学(北京)

地址 102249 北京市昌平区府学路18号

(72)发明人 程时清 冯乃超 于海洋 史文洋

(74)专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司

11283

代理人 王晓晓 肖冰滨

(51)Int.Cl.

E21B 43/243(2006.01)

E21B 47/00(2012.01)

E21B 47/26(2012.01)

G06Q 50/02(2012.01)

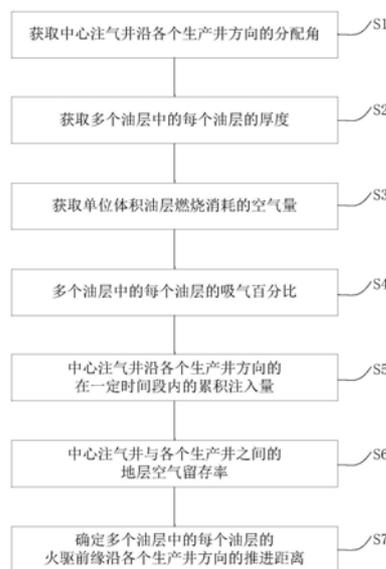
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

用于预测火驱前缘位置的方法及装置

(57)摘要

本发明实施例提供一种用于预测火驱前缘位置的方法及装置,属于石油开发技术领域。所述用于预测火驱前缘位置的方法包括:根据目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角、目标油藏的多个油层中的每个油层的厚度、单位体积油层燃烧消耗的空气量、所述多个油层中的每个油层的吸气百分比、所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量和所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率,确定所述多个油层中的每个油层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离。通过本发明的技术方案,可以预测多个油层中的每个油层的火驱前缘的推进距离,能够为多层火驱生产过程中调整注采参数提供依据。



1. 一种用于预测火驱前缘位置的方法,其特征在于,所述方法包括:

根据目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角、目标油藏的多个油层中的每个油层的厚度、单位体积油层燃烧消耗的空气量、所述多个油层中的每个油层的吸气百分比、所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量和所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率,确定所述多个油层中的每个油层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法通过以下公式确定所述多个油层中的某一层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离:

$$\frac{\alpha_i}{360} \pi R_{ik}^2 h_k A_s = I_{i0} \eta_k Y (1 - w_i)$$

其中, $\alpha_i$ 表示中心注气井沿生产井*i*方向的分配角、 $R_{ik}$ 表示第*k*层油层中火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $h_k$ 表示第*k*层油层的厚度、 $A_s$ 表示单位体积油层燃烧的空气量、 $I_{i0}$ 表示中心注气井沿所述生产井*i*方向的在一定时间段内的累积注入量、 $\eta_k$ 表示第*k*层油层的吸气百分比、 $Y$ 表示氧气利用率、 $w_i$ 表示中心注气井与生产井*i*之间的地层空气留存率。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,通过以下步骤确定所述目标油藏中每一油层的厚度:

对目标油藏进行精细油藏描述,以建立与所述目标油藏对应的地质模型;以及根据所述地质模型,确定所述目标油藏中每一油层的厚度。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,通过以下步骤确定所述单位体积油层燃烧消耗的空气量:

获取目标油藏所在位置的岩心和油样;以及根据所述岩心和油样,确定单位体积油层燃烧消耗的空气量。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,通过以下步骤确定所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量:

根据所述目标井组中的所述生产井的日尾气排量和各个所述生产井周围的一线注气井的日注气量,确定所述目标井组中的各个生产井与所述各个生产井周围的所述一线注气井之间的连通性;

根据所述各个生产井与所述各个生产井周围的所述一线注气井之间的连通性,确定所述各个生产井的受效方向及与所述受效方向对应的受效程度;

根据所述受效方向、所述受效程度和所述各个生产井在一定时间段内的总累积尾气排量,确定所述各个生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量;以及

根据所述中心注气井在所述一定时间段内的总累积注入量和所述各个生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量,确定所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在所述一定时间段内的累积注入量。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述方法还包括通过以下公式确定所述目标井组中的各个生产井与所述各个生产井周围的所述一线注气井之间的连通性:

$$q_i(t) = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} i_{ij}(t)$$

其中,  $q_i(t)$  表示生产井  $i$  的日尾气排量、 $\beta_0$  表示注采不平衡常数、 $\beta_{ij}$  表示生产井  $i$  与注气井  $j$  之间的连通系数、 $i_{ij}(t)$  表示注气井  $j$  的日注气量、 $n$  表示生产井  $i$  周围一线注气井数量。

7. 根据权利要求6所述的方法, 其特征在于, 所述方法还包括通过以下公式确定所述各个生产井来自所述各个生产井周围的一线注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量:

$$Q_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}} Q_i$$

其中,  $Q_{ij}$  表示生产井  $i$  来自注气井  $j$  方向的在一定时间段内的累积尾气排量,  $\beta_{ij}$  表示生产井  $i$  与注气井  $j$  之间的连通系数、 $Q_i$  表示生产井  $i$  在所述一定时间段内的总累积尾气排量、 $n$  表示生产井  $i$  周围一线注气井数量。

8. 根据权利要求7所述的方法, 其特征在于, 所述方法还包括通过以下公式确定所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在所述一定时间段内的累积注入量:

$$I_{i0} = \frac{Q_{i0}}{\sum_{i=1}^m Q_{i0}} I_0$$

其中,  $I_{i0}$  表示中心注气井沿生产井  $i$  方向的在一定时间段内的累积注入量、 $Q_{i0}$  表示生产井  $i$  来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $m$  表示目标井组内生产井的数量、 $I_0$  表示中心注气井在所述一定时间内的总累积注入量。

9. 根据权利要求5所述的方法, 其特征在于, 通过以下步骤确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率:

根据所述各个生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量、所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量以及氮气含量, 确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率。

10. 根据权利要求9所述的方法, 其特征在于, 所述方法还包括通过以下公式确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率:

$$w_i = 1 - \frac{Q_{i0} N_{Ti} / N_A}{I_{i0}}$$

其中,  $w_i$  表示中心注气井与生产井  $i$  之间的地层空气留存率、 $Q_{i0}$  表示生产井  $i$  来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $N_{Ti}$  表示生产井  $i$  的尾气中的氮气百分比、 $N_A$  表示注气井注入的空气中的氮气百分比、 $I_{i0}$  表示中心注气井沿生产井  $i$  方向的在一定时间段内的累积注入量。

11. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述方法还包括:

根据所述目标油藏的多个油层中的每个油层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离, 确定所述目标井组中的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离。

12. 根据权利要求11所述的方法, 其特征在于, 所述方法通过以下公式确定所述目标井

组中的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离：

$$R_i = \frac{R_{ik} h_k}{\sum_{k=1}^z h_k}$$

其中， $R_i$ 表示目标井组中的火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $R_{ik}$ 表示第*k*层油层中火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $h_k$ 表示第*k*层油层的厚度、 $z$ 表示目标油藏中的油层的层数。

13. 一种用于预测火驱前缘位置的装置，其特征在于，所述装置包括：存储器和处理器，所述存储器用于存储指令，所述指令使得所述处理器能够执行根据权利要求1至12中任意一项权利要求所述的用于预测火驱前缘位置的方法。

14. 一种机器可读存储介质，该机器可读存储介质上存储有指令，该指令用于使得机器执行本申请上述权利要求1-12中任意一项权利要求所述的用于预测火驱前缘位置的方法。

## 用于预测火驱前缘位置的方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及石油开发技术领域,具体地涉及一种用于预测火驱前缘位置的方法及装置。

### 背景技术

[0002] 火烧油层,又称火驱,是一种提高稠油油藏采收率的热采技术。其通过持续向油层注入空气并点燃油层,以热解反应过程中生成的类焦炭物为燃料,利用燃烧产生的热量提高底层原油的流动性,生成的二氧化碳和氮气形成烟道气驱,驱替原油向生产井推进。在油层稳定燃烧的过程中,燃烧带径向推进,形成火线(火线即火驱前缘位置)。

[0003] 由于火驱燃烧反应复杂,加上地层非均质性的影响,在注气过程中容易发生气窜,需要及时对注采参数进行调整,维持火线均匀推进。因此,确定注气井各个方向的火驱前缘的移动距离,对分析地下燃烧状态、采取合理的注气强度、及时进行生产调整,以及提高火驱开发效果均有重要的意义。

[0004] 对于采用面积井网多层火驱开发的稠油油藏,预测火驱前缘的位置主要有以下两个问题:

[0005] (1)、平面波及不均。采用面积井网开发,由于储层的平面非均质性,注气井与其控制范围内的各生产井连通性差异较大,与注气井连通性好的生产井的尾气排量高,火驱前缘沿该方向推进较快,连通性差的井的尾气排量低,火驱前缘沿该方向推进较慢。因此,在预测火驱前缘的位置之前,需要对注气井各个方向的注入量进行劈分。

[0006] (2)、纵向动用不均。多层火驱主要用于薄互层稠油油藏的开发,由于纵向非均质性较强,层间差异大,采用笼统注气,物性好的油层吸气多,动用程度较高,物性差的油层吸气少,动用程度较低。并且由于薄互层状的油藏的纵向层数多,且每层厚度都比较小,因此在研究薄互层状的油藏中的每一油层中的火驱位置时难度大。

[0007] 另外,本申请发明人发现,现有的基于物质平衡的火驱前缘位置的预测方法,都是针对单层均质油藏,并没有考虑多层火驱纵向动用不均的复杂情况,也没有预测多层油层中的火驱位置的技术方案。

### 发明内容

[0008] 本发明实施例的目的是提供一种用于预测火驱前缘位置的方法和一种用于预测火驱前缘位置的装置,用于解决上述技术问题。

[0009] 为了实现上述目的,本发明实施例提供一种用于预测火驱前缘位置的方法,所述方法包括:根据目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角、目标油藏的多个油层中的每个油层的厚度、单位体积油层燃烧消耗的空气量、所述多个油层中的每个油层的吸气百分比、所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量和所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率,确定所述多个油层中的每个油层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离。

[0010] 可选的,所述方法通过以下公式确定所述多个油层中的某一层的火驱前缘沿所述

各个生产井方向的推进距离:
$$\frac{\alpha_i}{360} \pi R_{ik}^2 h_k A_s = I_{i0} \eta_k Y (1 - w_i)$$
,其中, $\alpha_i$ 表示中心注气

井沿生产井*i*方向的分配角、 $R_{ik}$ 表示第*k*层油层中火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $h_k$ 表示第*k*层油层的厚度、 $A_s$ 表示单位体积油层燃烧的空气量、 $I_{i0}$ 表示中心注气井沿所述生产井*i*方向的在一定时间段内的累积注入量、 $\eta_k$ 表示第*k*层油层的吸气百分比、 $Y$ 表示氧气利用率、 $w_i$ 表示中心注气井与生产井*i*之间的地层空气留存率。

[0011] 可选的,通过以下步骤确定所述目标油藏中每一油层的厚度:对目标油藏进行精细油藏描述,以建立与所述目标油藏对应的地质模型;以及根据所述地质模型,确定所述目标油藏中每一油层的厚度。

[0012] 可选的,通过以下步骤确定所述单位体积油层燃烧消耗的空气量:获取目标油藏所在位置的岩心和油样;以及根据所述岩心和油样,确定单位体积油层燃烧消耗的空气量。

[0013] 可选的,通过以下步骤确定所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量:根据所述目标井组中的所述生产井的日尾气排量 and 各个所述生产井周围的一线注气井的日注气量,确定所述目标井组中的各个生产井与各个所述生产井周围的所述一线注气井之间的连通性;根据所述各个生产井与各个所述生产井周围的所述一线注气井之间的连通性,确定所述各个生产井的受效方向及与所述受效方向对应的受效程度;根据所述受效方向、所述受效程度和各个所述生产井在一定时间段内的总累积尾气排量,确定所述各个生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量;以及根据所述中心注气井在所述一定时间段内的总累积注入量和各个所述生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量,确定所述中心注气井沿各个所述生产井方向的在所述一定时间段内的累积注入量。

[0014] 可选的,所述方法还包括通过以下公式确定所述目标井组中的各个生产井与各个

各个生产井周围的所述一线注气井之间的连通性:
$$q_i(t) = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} i_{ij}(t)$$
,其中, $q_i$

( $t$ )表示生产井*i*的日尾气排量、 $\beta_0$ 表示注采不平衡常数、 $\beta_{ij}$ 表示生产井*i*与注气井*j*之间的连通系数、 $i_{ij}(t)$ 表示注气井*j*的日注气量、 $n$ 表示生产井*i*周围一线注气井数量。

[0015] 可选的,所述方法还包括通过以下公式确定井所述各个生产井来自各个生产

井周围的一线注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量:
$$Q_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}} Q_i$$
,

其中, $Q_{ij}$ 表示生产井*i*来自注气井*j*方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $\beta_{ij}$ 表示生产井*i*与注气井*j*之间的连通系数、 $Q_i$ 表示生产井*i*在所述一定时间段内的总累积尾气排量、 $n$ 表示生产井*i*周围一线注气井数量。

[0016] 可选的,所述方法还包括通过以下公式确定所述中心注气井沿各个生产井方

向的在所述一定时间段内的累积注入量:
$$I_{i0} = \frac{Q_{i0}}{\sum_{i=1}^m Q_{i0}} I_0$$
,其中, $I_{i0}$ 表示中心注气井沿

生产井i方向的在一定时间段内的累积注入量、 $Q_{i0}$ 表示生产井i来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $m$ 表示目标井组内生产井的数量、 $I_0$ 表示中心注气井在所述一定时间内的总累积注入量。

[0017] 可选的,通过以下步骤确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率:所述各个生产井来自所述中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量、所述中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量以及氮气含量,确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率。

[0018] 可选的,所述方法还包括通过以下公式确定所述中心注气井与所述各个生产井之间的地层空气留存率: $w_i = 1 - \frac{Q_{i0} N_{Ti} / N_A}{I_{i0}}$ ,其中, $w_i$ 表示中心注气井与生产井i之间的

地层空气留存率、 $Q_{i0}$ 表示生产井i来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $N_{Ti}$ 表示生产井i的尾气中的氮气百分比、 $N_A$ 表示注气井注入的空气中的氮气百分比、 $I_{i0}$ 表示中心注气井沿生产井i方向的在一定时间段内的累积注入量。

[0019] 可选的,所述方法还包括:根据所述目标油藏的多个油层中的每个油层的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离,确定所述目标井组中的火驱前缘沿所述各个生产井方向的推进距离。

[0020] 可选的,所述方法通过以下公式确定所述目标井组中的火驱前缘沿所述各个生产

井方向的推进距离: $R_i = \frac{R_{ik} h_k}{\sum_{k=1}^z h_k}$ ,其中, $R_i$ 表示目标井组中的火驱前缘沿生产井i方向的

推进距离、 $R_{ik}$ 表示第k层油层中火驱前缘沿生产井i方向的推进距离、 $h_k$ 表示第k层油层的厚度、 $z$ 表示目标油藏中的油层的层数。

[0021] 相应的,本发明还提供一种用于预测火驱前缘位置的装置,所述装置包括:存储器和处理器,所述存储器用于存储指令,所述指令使得所述处理器能够执行根据本申请实施例所述的用于预测火驱前缘位置的方法。

[0022] 相应的,本发明还提供一种机器可读存储介质,该机器可读存储介质上存储有指令,该指令用于使得机器执行本申请实施例所述的用于预测火驱前缘位置的方法。

[0023] 本发明实施例提供的技术方案,考虑了井网内平面波及不均和纵向动用不均的影响,通过上述技术方案,可以预测多个油层中的每个油层的火驱前缘的推进距离,能够为多层火驱生产过程中调整注采参数提供依据。并且本发明实施例提供的技术方案,还可以判断井间连通性和地下燃烧状态。

[0024] 本发明实施例的其它特征和优点将在随后的具体实施方式部分予以详细说明。

## 附图说明

[0025] 附图是用来提供对本发明实施例的进一步理解,并且构成说明书的一部分,与下面的具体实施方式一起用于解释本发明实施例,但并不构成对本发明实施例的限制。在附图中:

[0026] 图1是本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的方法流程图;

- [0027] 图2是本发明实施例提供的目标井组的结构示意图；
- [0028] 图3是本发明实施例提供的油层剖面示意图；
- [0029] 图4是本发明实施例提供的生产井的受效方向及受效程度的示意图；
- [0030] 图5是本发明实施例提供的目标井组火驱位置平面图；
- [0031] 图6是本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的装置的结构示意图。
- [0032] 附图标记说明
- |        |            |                  |    |       |
|--------|------------|------------------|----|-------|
| [0033] | 1-8        | 生产井              | 01 | 中心注气井 |
| [0034] | 02-09      | 相邻注气井            | 10 | 存储器   |
| [0035] | 20         | 处理器              |    |       |
| [0036] | $\alpha_1$ | 中心注气井沿生产井1方向的分配角 |    |       |
| [0037] | $\alpha_2$ | 中心注气井沿生产井2方向的分配角 |    |       |

### 具体实施方式

[0038] 以下结合附图对本发明实施例的具体实施方式进行详细说明。应当理解的是，此处所描述的具体实施方式仅用于说明和解释本发明实施例，并不用于限制本发明实施例。

[0039] 图1是本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的方法流程图。如图1所示，该方法可包括如下步骤。

[0040] 在步骤S1中，获取根据目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角。

[0041] 其中，所述目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角指的是：某一生产井与两个相邻生产井的距离的中点与中心注气井连线所构成的夹角。如图2所示，生产井1与生产井2和生产井4的中心分别与中心注气井01的连线构成了夹角 $\alpha_1$ 。所述 $\alpha_1$ 就表示中心注气井01沿生产井1方向的分配角。类似的， $\alpha_2$ 中心注气井01沿生产井2方向的分配角。所述分配角的大小是由中心注气井和各个生产井之间的位置关系决定的，在确定目标井组之后，中心注气井沿任一生产井方向的分配角是确定的。

[0042] 在步骤S2中，获取目标油藏的多个油层中的每个油层的厚度。

[0043] 为了解决现有技术中没有办法预测不同油层中火驱前缘的位置的问题，需要先确定目标油藏中的每一油层的厚度，这样才能预测目标油藏中的每一油层中的火驱前缘的位置。

[0044] 具体的，本发明实施例还提供了一种确定目标油藏中每一油层的厚度的方法，其包括：对目标油藏进行精细油藏描述，以建立与目标油藏对应的地质模型，并根据所述地质模型，确定目标油藏中的每一油层的厚度。

[0045] 其中，油藏描述是指对油藏各种特征进行三维空间的定量描述和表征，综合多种理论和学科方法，定性和定量地描述三维空间中的油藏类型、外部几何形状，规模大小、油藏内部结构等参数。在进行石油勘探和开采时，进行油藏描述是必不可少的步骤，本发明实施例提供的技术方案仅需获取建立的地质模型中的每一油层的厚度即可。

[0046] 在步骤S3中，获取单位体积油层燃烧消耗的空气量。

[0047] 在本发明实施例提供的技术方案中还需要确定单位体积油层燃烧消耗的空气量。在本发明该实施例中，还提供了一种用于确定单位体积油层燃烧消耗的空气量的方法：先获取目标油藏所在位置的岩心和油样，并根据岩心和油样，确定单位体积油层燃烧消耗的

空气量。

[0048] 例如,通过取心井等设备可以钻取地下岩心和油样。工作人员通过对由所述岩心和油样构成的物理模型进行鉴定、分析和实验后,通过现有的实验手段就能测定单位体积油层燃烧消耗的空气量。

[0049] 可选的,可以通过砂子和油样确定单位体积油层燃烧消耗的空气量。

[0050] 在步骤S4中,获取多个油层中的每个油层的吸气百分比。

[0051] 在进行火驱开发过程中,火线的推进距离会受到油层的吸气能力的影响。因此,可以通过吸气剖面测试资料,分析并确定纵向上各油层的吸气百分比。工作人员根据各个油层的吸气百分比,就能确定各个油层的吸气能力差异。

[0052] 在步骤S5中,获取中心注气井沿各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量。

[0053] 本发明实施例提供了一种用于确定中心注气井沿各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量的方法,其包括:

[0054] 根据生产井的日尾气排量和各个生产井周围的一线注气井的日注气量,确定各个生产井与各个生产井周围的一线注气井之间的连通性;

[0055] 根据各个生产井与各个生产井周围的一线注气井之间的连通性,确定各个生产井的受效方向及与所述受效方向对应的受效程度;

[0056] 根据所述受效方向、受效程度和各个生产井在一定时间段内的总累积尾气排量,确定各个生产井来自中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量;以及

[0057] 根据中心注气井在所述一定时间段内的总累积注入量和各个生产井来自中心注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量,确定中心注气井沿各个生产井方向的在所述一定时间段内的累积注入量。

[0058] 可选的,还可以通过中心注气井的日注气量和生产井的日产液量(包括日产油量和日产水量)来确定的中心注气井与各个生产井之间的连通性。

[0059] 但是由于通过火驱技术开采油藏的特殊性,注气井注气量的变化引起的生产井产液量的变化会有延迟,一般都会延迟几个月,因此,不利于获取快速的响应数据。而本发明实施例提供的技术方案中,注气井的注气量对生产井的尾气排量的影响比较快,并且如果注气量与尾气排量之间的相关性好,就表示对应的注气井和生产井之间的连通性好。

[0060] 相应的,本发明实施例还提供了一种用于确定目标井组中的各个生产井与各个生

产井周围的一线注气井之间的连通性的公式:
$$q_i(t) = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} i_{ij}(t)。$$

[0061]  $q_i(t)$  表示生产井*i*的日尾气排量、 $\beta_0$ 表示注采不平衡常数、 $\beta_{ij}$ 表示生产井*i*与注气井*j*之间的连通系数,即其表示的是生产井*i*与注气井*j*之间的连通性、 $i_{ij}(t)$ 表示注气井*j*的日注气量、*n*表示生产井*i*周围一线注气井数量(例如,如图2所示,生产井1周围一线注气井为中心注气井01、相邻注气井02、相邻注气井03和相邻注气井05,所以*n*为4,生产井2周围一线注气井为中心注气井01和相邻注气井03,所以*n*为2)。

[0062] 其中,生产井*i*的日尾气排量 $q_i(t)$ 、注气井*j*的日注气量 $i_{ij}(t)$ 和生产井*i*周围一线注气井数量*n*在进行石油开采工作过程中都是已知的。

[0063] 其中,如果要确定中心注气井与各个生产井之间的连通系数,需要将各个生产井的日尾气排量和各个生产井周围的一线注气井的日注气量代入上述用于确定连通性的公式,并通过矩阵计算确定结果。例如,如图2所示,将生产井1的日尾气排量、中心注气井01的日注气量、相邻注气井02的日注气量、相邻注气井03的日注气量和相邻注气井05的日注气量代入上述公式中,经过计算即可确定生产井1与中心注气井01之间的连通系数,同时还能够确定生产井1分别与相邻注气井02、相邻注气井03和相邻注气井05之间的连通系数。

[0064] 另外,本发明实施例中提到的受效方向,指注气井j到生产井i方向,与受效方向对应的受效程度,则表示生产井i排出的尾气中,来自注气井j方向的尾气所占的比例。

[0065] 相应的,本发明实施例还提供了一种用于确定各个生产井来自各个生产井周围的一

一线注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量的公式:
$$Q_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}} Q_i。$$

[0066] 其中, $Q_{ij}$ 表示生产井i来自注气井j方向的在一定时间段内的累积尾气排量, $\beta_{ij}$ 表示生产井i与注气井j之间的连通系数、 $Q_i$ 表示生产井i在所述一定时间段内的总累积尾气排量、n表示生产井i周围一线注气井数量。

[0067] 其中,生产井i在所述一定时间段内的总累积尾气排量 $Q_i$ 和生产井i周围一线注气井数量n在进行石油开采工作过程中都是已知的。生产井i与注气井j之间的连通系数 $\beta_{ij}$ 可以通过本发明实施例提供的方法确定,或者通过任意一种现有的技术手段确定。

[0068] 相应的,本发明实施例还提供了一种用于确定中心注气井沿各个生产井方向的在

所述一定时间段内的累积注入量的公式:
$$I_{i0} = \frac{Q_{i0}}{\sum_{i=1}^m Q_{i0}} I_0。$$

[0069] 其中, $I_{i0}$ 表示中心注气井沿生产井i方向的在一定时间段内的累积注入量、 $Q_{i0}$ 表示生产井i来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、m表示目标井组内生产井的数量、 $I_0$ 表示中心注气井在所述一定时间内的总累积注入量。

[0070] 其中,生产井i来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量 $Q_{i0}$ 可以由本发明实施例提供的上述用于确定各个生产井来自各个生产井周围的一线注气井方向的在所述一定时间段内的累积尾气排量的公式进行计算确定,中心注气井在所述一定时间内的总累积注入量 $I_0$ 在进行石油开采工作过程中是已知的。

[0071] 另外,本发明该实施例中提到的“一定时间段”可以由工作人员根据实际工作需要自行设定。

[0072] 在步骤S6中,获取中心注气井与各个生产井之间的地层空气留存率。

[0073] 本发明实施例提供了一种通过以下步骤确定中心注气井与各个生产井之间的地层空气留存率的方法:

[0074] 获取各个生产井来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量;

[0075] 获取中心注气井沿各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量;

[0076] 获取氮气含量,包括生产井排出的尾气中的氮气含量和中心注气井注入的空气中的含量;以及

[0077] 根据上述获取的数据,确定中心注气井与各个生产井之间的地层空气留存率。

[0078] 相应的,本发明实施例还提供了一种用于确定中心注气井与各个生产井之间的地

层空气留存率的公式: $w_i = 1 - \frac{Q_{i0} N_{Ti} / N_A}{I_{i0}}$ 。

[0079] 其中, $w_i$ 表示中心注气井与生产井*i*之间的地层空气留存率、 $Q_{i0}$ 表示生产井*i*来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量、 $N_{Ti}$ 表示生产井*i*的尾气中的氮气百分比、 $N_A$ 表示注气井注入的空气中的氮气百分比、 $I_{i0}$ 表示中心注气井沿生产井*i*方向的在一定时间段内的累积注入量。

[0080] 其中,生产井*i*来自中心注气井方向的在一定时间段内的累积尾气排量 $Q_{i0}$ 和中心注气井沿生产井*i*方向的在一定时间段内的累积注入量 $I_{i0}$ 可根据本发明实施例提供的方法进行确定,也可以通过其他方法进行确定。

[0081] 其中,在利用火驱技术开采油藏的过程中,氮气不参与燃烧反应。注气井注入的空气中的氮气含量百分比是已知的,根据注入的空气量,可以确定注入的氮气总量。根据排出的尾气总量和测定的尾气中的氮气的比例,可确定排出的尾气中的氮气总量。再根据注入的氮气总量和排出的氮气总量的差值,确定空气在地层中的留存率。

[0082] 上述步骤S1-S6的顺序不限于本发明实施例所示的顺序,可以根据实际情况按照任意的顺序获取所需的数据。

[0083] 在步骤S7中,根据目标井组中的中心注气井沿各个生产井方向的分配角、目标油藏的多个油层中的每个油层的厚度、单位体积油层燃烧消耗的空气量、多个油层中的每个油层的吸气百分比、中心注气井沿所述各个生产井方向的在一定时间段内的累积注入量和中心注气井与各个生产井之间的地层空气留存率,确定多个油层中的每个油层的火驱前缘沿各个生产井方向的推进距离。

[0084] 本发明实施例还提供了一种用于确定多个油层中的每个油层的火驱前缘沿各个

生产井方向的推进距离的公式: $\frac{\alpha_i}{360} \pi R_{ik}^2 h_k A_s = I_{i0} \eta_k Y (1 - w_i)$ 。

[0085] 其中, $\alpha_i$ 表示中心注气井沿生产井*i*方向的分配角、 $R_{ik}$ 表示第*k*层油层中火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $h_k$ 表示第*k*层油层的厚度、 $A_s$ 表示单位体积油层燃烧的空气量、 $I_{i0}$ 表示中心注气井沿所述生产井*i*方向的在一定时间段内的累积注入量、 $\eta_k$ 表示第*k*层油层的吸气百分比、 $Y$ 表示氧气利用率、 $w_i$ 表示中心注气井与生产井*i*之间的地层空气留存率。

[0086] 其中,上述公式中的各个参数的具体数值,都可以通过本发明实施例提供的方法确定,也可以通过其他现有的方法来确定。

[0087] 可选的,为了给石油开采工作提供更多有意义的参考数据,本发明实施例提供了一种用于根据所确定的目标井组的多个油层中的每个油层的火驱前缘沿各个生产井方向的推进距离,确定目标井组中的火驱前缘沿各个生产井方向的推进距离的技术方案。

[0088] 相应的,本发明实施例还提供了一种用于确定目标井组中的火驱前缘沿各个生产

井方向的推进距离的公式: $R_i = \frac{R_{ik} h_k}{\sum_{k=1}^z h_k}$ 。

[0089] 其中, $R_i$ 表示目标井组中的火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $R_{ik}$ 表示第*k*层油

层中火驱前缘沿生产井*i*方向的推进距离、 $h_k$ 表示第*k*层油层的厚度、*z*表示目标油藏中的油层的层数。

[0090] 优选的,本发明实施例提供的技术方案适用于满足以下条件的目标油藏:油层边界有断层和岩性遮挡,不与水体相连;油层层数大于1,平均单层厚度大于1m;隔层连续分布;平均含油饱和度大于35%;平均孔隙度大于18%;地层原油粘度小于10000Pa·S;平均渗透率大于200mD。

[0091] 优选的,目标井组满足如下条件:采用井网面积开发,井距小于200m;注气井持续注入,无长期关停,注气强度大于 $200\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ;生产井平均氧气利用率大于85%,平均尾气二氧化碳含量大于12%。

[0092] 为了便于理解本发明实施例提供的技术方案,现提供一具体实施例来详细解释本发明的技术方案。

[0093] (1) 选定目标油藏和目标井组:目标油藏位于中国东部某油田,为中深层薄互层状普通稠油油藏,埋深为800~1200米,目的层包括4个砂岩组20~40个油层,油层间隔层发育良好,边界封闭性较好。油藏平均孔隙度为19.3%,平均渗透率为774mD,平均含油饱和度为40%,地层原油粘度为1800Pa·S。其中,目标井组的结构示意图如图2所示,采用100m\*141m正方形反九点井网开发,其油层渗透率剖面图如图3所示,纵向包含13个油层,平均单层厚度为2.3m,中心注气井01累积注入空气 $22.81\times 10^6\text{m}^3$ ,平均注气强度为 $271\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ,生产井平均氧气利用率为93%,平均尾气二氧化碳含量为18%。其中,根据图3所示的剖面图中的油层图像的灰度,对应图3右侧的标度,可以确定每一油层的对应渗透率。

[0094] (2) 利用开发过程中获取的岩心和油样,开展火驱室内物理模拟研究,测定燃烧单位体积油层的空气消耗量为 $248\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

[0095] (3) 根据目标井组内生产井的日尾气排量资料和目标井组及其相邻井组中注气井的日注气资料,判断目标井组内各生产井的受效方向和受效程度,采用本发明实施例提供的方法计算目标井组内生产井各受效方向的尾气贡献量。根据生产井各个受效方向的尾气贡献量和总的尾气贡献量,可以确定各个受效方向的尾气贡献率,其分析和计算结果如图4所示。其中,本发明该实施例提供的累积时间为12年。中心注气井01、注气井02、注气井03、注气井04、注气井05、注气井06、注气井07、注气井08和注气井09的累积注入量分别为: $22.81\times 10^6\text{m}^3$ 、 $23.10\times 10^6\text{m}^3$ 、 $19.76\times 10^6\text{m}^3$ 、 $21.12\times 10^6\text{m}^3$ 、 $0.92\times 10^6\text{m}^3$ 、 $21.16\times 10^6\text{m}^3$ 、 $20.03\times 10^6\text{m}^3$ 、 $0.04\times 10^6\text{m}^3$ 和 $17.38\times 10^6\text{m}^3$ 。生产井1、生产井2、生产井3、生产井4、生产井5、生产井6、生产井7和生产井8的累积尾气排量分别为: $6.37\times 10^6\text{m}^3$ 、 $4.37\times 10^6\text{m}^3$ 、 $4.78\times 10^6\text{m}^3$ 、 $4.28\times 10^6\text{m}^3$ 、 $7.51\times 10^6\text{m}^3$ 、 $0.63\times 10^6\text{m}^3$ 、 $1.86\times 10^6\text{m}^3$ 和 $0.44\times 10^6\text{m}^3$ 。经计算确定,中心注气井01对生产井1、生产井2、生产井3、生产井4、生产井5、生产井6、生产井7和生产井8的尾气贡献率分别为:74.2%、35.2%、13.4%、91.3%、82.1%、67.9%、93.3%和13.9%。另外,还可以确定注气井02、注气井03和注气井05对生产井1的尾气贡献率分别为:6.4%、14.8%和4.6%;注气井03对生产井2的尾气贡献率为64.8%;注气井03、注气井04和注气井06对生产井3的尾气贡献率为4.5%、79.1%和3%;注气井05对生产井4的尾气贡献率为8.7%;注气井06对生产井5的尾气贡献率为17.9%;注气井05、注气井06和注气井08对生产井6的尾气贡献率为1.2%、21%和9.9%;注气井08对生产井7的尾气贡献率为6.7%;注气井06、注气井08和注气井09对生产井8的尾气贡献率为23.6%、10.2%和52.3%。

[0096] (4) 根据目标井组中注气井对各生产井的尾气贡献量,判断目标井组内的井间连通性,劈分注气井沿各生产井方向的空气注入量。再根据各个生产井总的空气注入量和中心注气井的空气注入量确定中心注气井对各生产井方向的注气比例。经过分析和计算后,确定中心注气井01沿生产井1、生产井2、生产井3、生产井4、生产井5、生产井6、生产井7和生产井8方向的注气比例分别为:25.6%、8.3%、3.5%、19.5%、29.3%、2.3%、9.4%和1.9%。并且根据本发明实施例提供的技术方案,确定注入空气的平均地层空气留存率为24.5%。

[0097] (5) 再根据吸气剖面测试资料,分析纵向上各油层的吸气能力。油层1-11的吸气百分比分别为:6%、8%、24%、12%、9%、3%、18%、0%、5%、6%和9%,由于仪器下至油层11处遇阻,油层11吸气9%为油层11-13的吸气量总和。

[0098] (6) 采用本发明实施例提供的预测火驱前缘位置的方法,计算出各生产井方向上的火线推进距离。根据计算获得的相关数据,绘制目标井组火驱前缘位置的平面图,如图5所示。

[0099] 其中,图5中示出的是油层1-13层的火驱前缘的平均位置。根据本发明实施例的技术方案,还可以根据实际需要计算并确定每一油层中的火驱前缘的位置,并绘制出单独的一个油层中的火驱前缘位置的平面图。

[0100] 本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的方法,综合考虑了井网内平面波及不均和纵向动用不均的影响,通过分析目标井组内的井间连通性和各个油层的吸气能力,预测多层火驱推进位置,为多层火驱生产过程中注采参数的调控提供依据。

[0101] 图6是本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的装置的结构示意图。如图6所示,本发明实施例还提供了一种用于预测火驱前缘位置的装置,其包括存储器10和处理器20。其中,存储器10与处理器20相连接,存储器10用于存储指令,所述指令用于使得处理器20能够执行本发明实施例提供的任一种用于预测火驱前缘位置的方法。

[0102] 可选的,处理器20可以为通用处理器、专用处理器、常规处理器、数字信号处理器(DSP, Digital Signal Processing)、多个微处理器、与DSP核心关联的一个或多个微处理器、控制器、微控制器、专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit)、现场可编程门阵列(FPGA, Field-Programmable Gate Array)电路、其他任何类型的集成电路(IC, Integrated Circuit)、嵌入式处理器等等可以实现上述功能的设备。

[0103] 有关本发明提供的上述用于预测火驱前缘位置的装置的具体细节和益处,可参阅上述针对本发明提供的用于预测火驱前缘位置的方法的描述,于此不再赘述。

[0104] 相应的,本发明实施例还提供了一种机器可读存储介质,所述机器可读存储介质上存储有指令,所述指令用于使得机器执行本发明实施例提供的用于预测火驱前缘位置的方法。

[0105] 以上结合附图详细描述了本发明实施例的可选实施方式,但是,本发明实施例并不限于上述实施方式中的具体细节,在本发明实施例的技术构思范围内,可以对本发明实施例的技术方案进行多种简单变型,这些简单变型均属于本发明实施例的保护范围。

[0106] 另外需要说明的是,在上述具体实施方式中所描述的各个具体技术特征,在不矛盾的情况下,可以通过任何合适的方式进行组合。为了避免不必要的重复,本发明实施例对各种可能的组合方式不再另行说明。

[0107] 本领域技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分步骤是可以通过程序来指令相关的硬件来完成,该程序存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得单片机、芯片或处理器(processor)执行本申请各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0108] 此外,本发明实施例的各种不同的实施方式之间也可以进行任意组合,只要其不违背本发明实施例的思想,其同样应当视为本发明实施例所公开的内容。

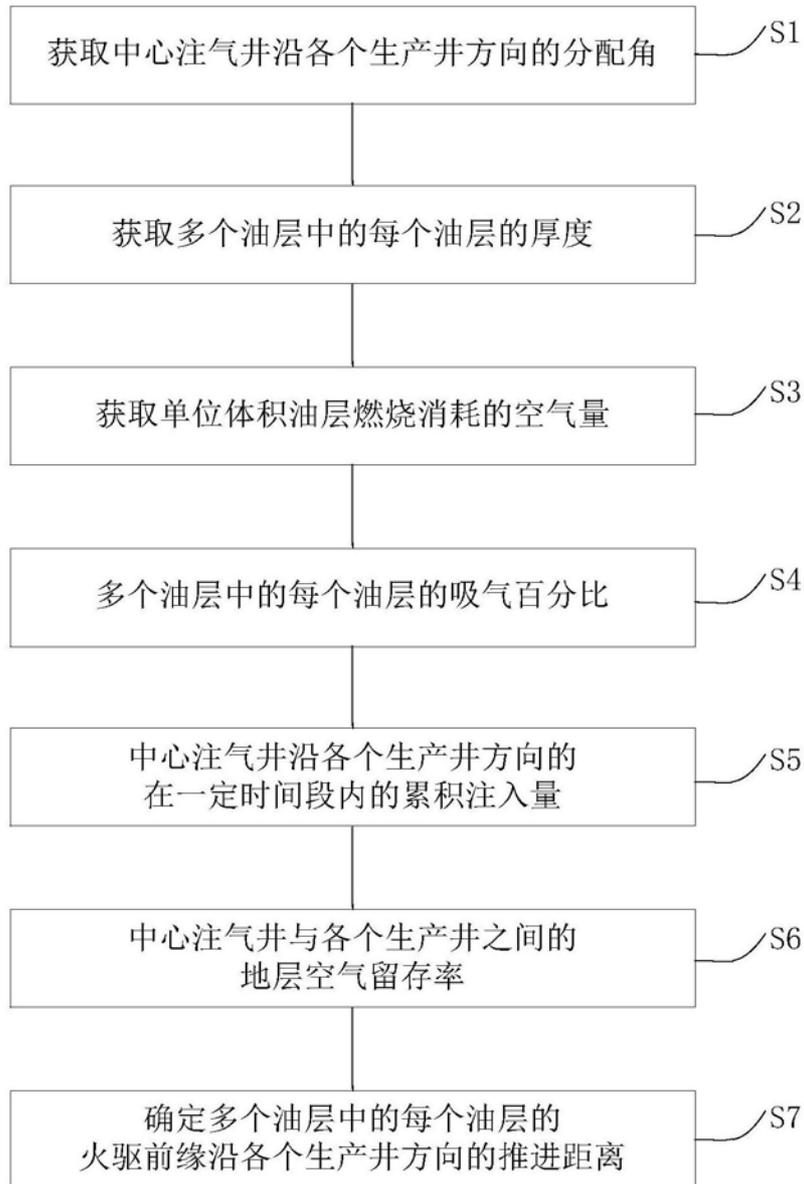


图1

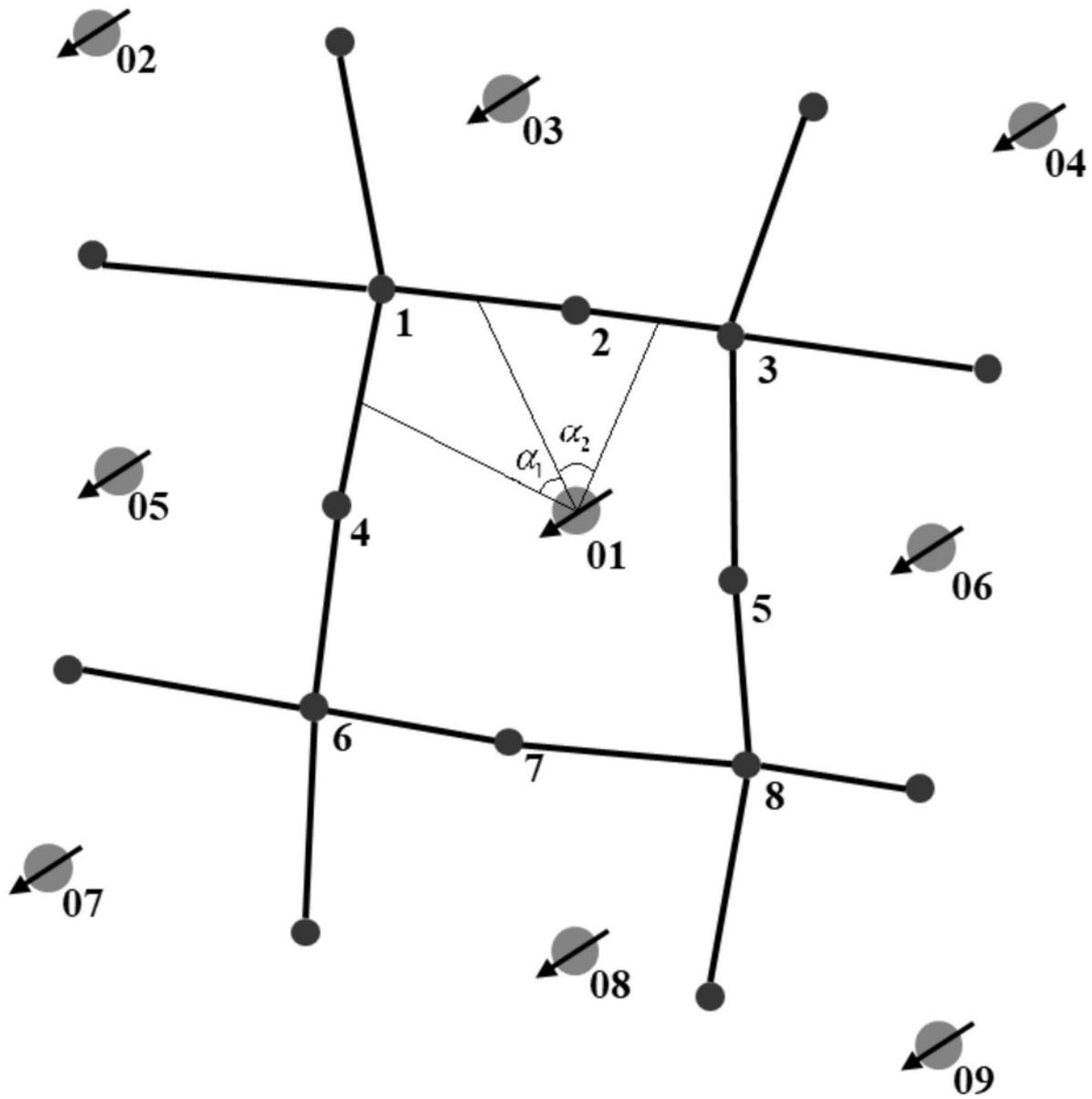


图2

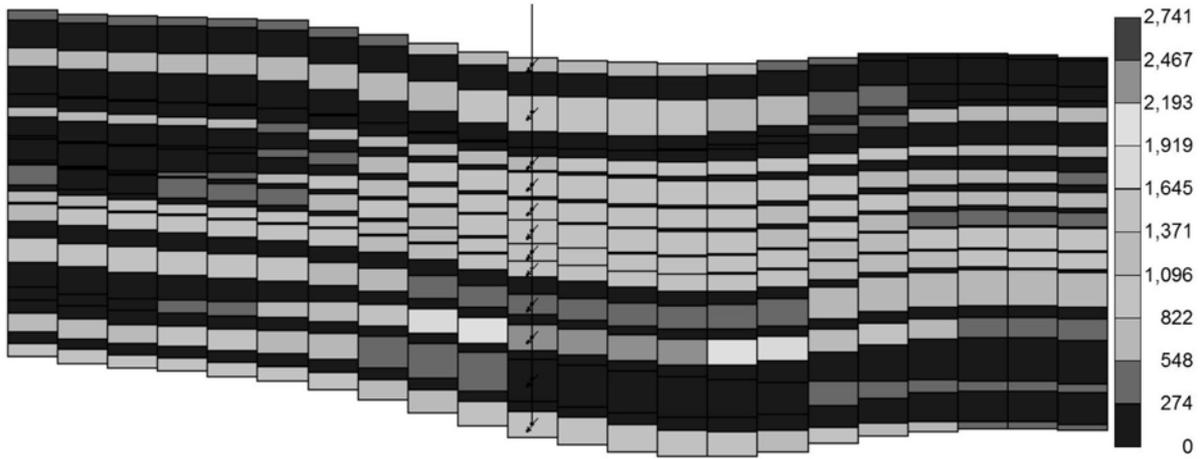


图3

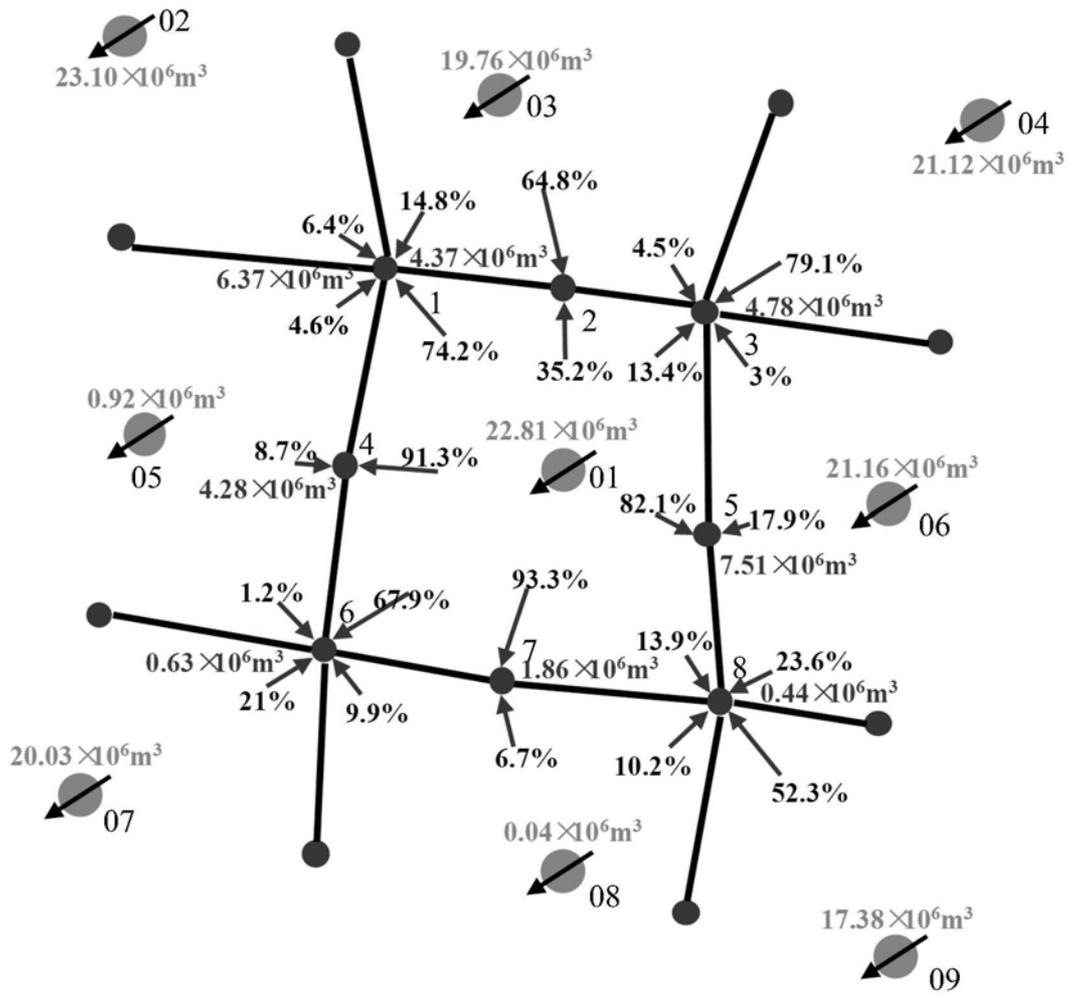


图4

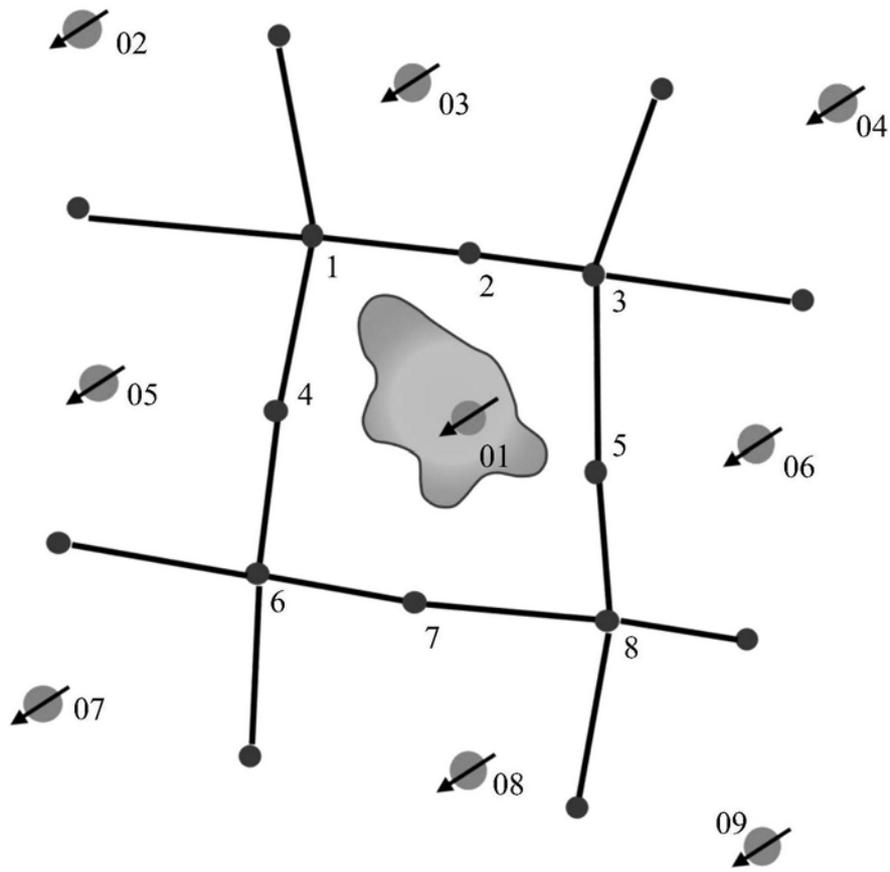


图5



图6