



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118296922 A

(43) 申请公布日 2024. 07. 05

(21) 申请号 202410725399.3

G06F 119/14 (2020.01)

(22) 申请日 2024.06.06

(71) 申请人 中国石油大学(华东)

地址 257061 山东省东营市东营区北一路
739号中国石油大学(华东)

(72) 发明人 付炜皓 孙致学 李昕睿 王燕
肖康 童凯军 王亚君 井艺皓

(74) 专利代理机构 济南克雷姆专利代理事务所
(普通合伙) 37279

专利代理师 杨婷

(51) Int. Cl.

G06F 30/25 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 119/08 (2020.01)

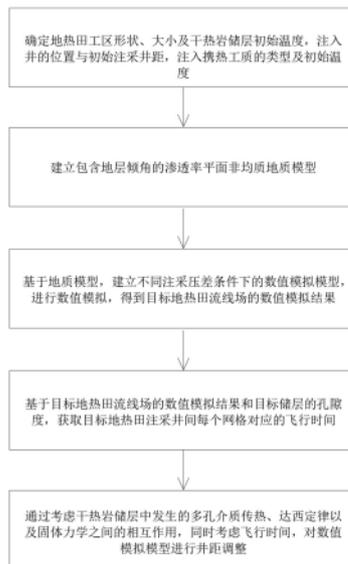
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法

(57) 摘要

本发明属于地热能井网优化技术领域,具体涉及一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法。本发明基于包含地层倾角的渗透率平面非均质地质模型,构建考虑不同注采压差条件下的数值模拟模型,通过渗透率非均质性、不同注采压差与地层倾角间的相互作用来确定飞行时间,并基于飞行时间,考虑干热岩储层中发生的多孔介质传热、达西定律以及固体力学之间的相互作用,对构建好的数值模拟模型进行井距调整。本发明首次提出了考虑储层渗透率非均质性的含地层倾角的干热岩储层地质模型在不同注采压差条件下开发深层干热岩储层热能时的井网优化方法,模拟结果真实可靠,达到了优化井网部署,提高热采收率的效果,为干热岩型地热田井网布局提供一种新思路。



1. 一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:基于钻孔岩心温度监测、地质露头考察和地球物理地层预测结果,确定目标深层高温干热岩储层所在地热田工区形状、大小及干热岩储层初始温度,基于物探资料确定注入井的位置与初始注采井距,并基于目标地热田开发现状确定注入携热工质的类型及初始温度;

步骤二:根据步骤一所确定的地热田工区形状、大小及干热岩储层初始温度,考虑干热岩储层渗透率平面非均质性及其地层倾角,建立包含地层倾角的渗透率平面非均质地质模型,其中将以水为携热工质的流体从注入井流入采出井之间的时间为飞行时间;

步骤三:基于上述构建的地质模型,建立考虑不同注采压差条件下的数值模拟模型,通过对考虑干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行数值模拟,得到目标地热田流线场的数值模拟结果;

步骤四:基于目标地热田流线场的数值模拟结果和目标储层的孔隙度,获取目标地热田注采井间每个网格对应的飞行时间;

步骤五:通过考虑干热岩储层中发生的多孔介质传热、达西定律以及固体力学之间的相互作用,同时考虑飞行时间,对于构建好的包含考虑干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行井距调整。

2. 根据权利要求1所述的一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法,其特征在于,步骤四中,注采井间每个网格对应的飞行时间为:

$$Tof_x = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{x}(s))}{|\vec{v}(x(s))|} dx;$$

$$Tof_y = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{y}(s))}{|\vec{v}(y(s))|} dy;$$

式中:

Tof_x 为注入井或采出井x方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

Tof_y 为注入井或采出井y方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

$\Phi(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\Phi(\vec{y}(s))$ 为y方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\vec{v}(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的携热工质流动速度,单位m/h;

$\vec{v}(\vec{y}(s))$ 为y方向向量距离上的携热工质流动速度,单位m/h。

3. 根据权利要求1所述的一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法,其特征在于,步骤五中,井距调整采用的公式为:

$$\frac{d_x}{d_y} = \frac{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} * \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}}{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} + \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}};$$

式中： d_x 为x方向上的井距，单位m； d_y 为y方向上的井距，单位m； K_x 为x方向上的渗透率，单位md； K_y 为y方向上的渗透率，单位md； Cov_{Tof_x} 为Tof场空间分布协方差矩阵x方向上的特征值， Cov_{Tof_y} 为Tof场空间分布协方差矩阵y方向上的特征值。

4. 根据权利要求3所述的一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法，其特征在于，Tof场空间分布协方差矩阵的形式为：

$$Cov_{Tof} = \begin{bmatrix} Cov(Tof_x, Tof_x) & Cov(Tof_x, Tof_y) \\ Cov(Tof_y, Tof_x) & Cov(Tof_y, Tof_y) \end{bmatrix};$$

式中，

$$Cov(Tof_x, Tof_x) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_x, Tof_y) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_x) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_y) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

其中， Tof_x 为注入井或采出井x方向井距离r的流体粒子的飞行时间，单位h； Tof_y 为注入井或采出井y方向井距离r的流体粒子的飞行时间，单位h； E_x 为 Tof_x 的期望值， E_y 为 Tof_y 的期望值。

5. 根据权利要求3所述的一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法，其特征在于， Cov_{Tof_x} 的计算公式为：

$$Cov_{Tof_x} = E_x * Cov_{Tof};$$

Cov_{Tof_y} 的计算公式为：

$$Cov_{Tof_y} = E_y * Cov_{Tof};$$

式中， E_x 为 Tof_x 的期望值， E_y 为 Tof_y 的期望值， Cov_{Tof_x} 为Tof场空间分布协方差矩阵x方向上的特征值， Cov_{Tof_y} 为Tof场空间分布协方差矩阵y方向上的特征值， Cov_{Tof} 为Tof场空间分布协方差矩阵。

一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法

技术领域

[0001] 本发明属于地热能井网优化技术领域,具体涉及一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法。

背景技术

[0002] 地热资源是一种重要的清洁可再生能源,我国中深层地热资源丰富,加快中深层地热资源的开采进程对调整我国能源结构、节能减排意义重大。地热资源综合考虑热流体传输方式、温度范围以及开发利用方式等因素,可分为浅层地热能、水热型地热能 and 干热岩型地热能三种类型。其中,以开采和利用地下3~10 km低渗透结晶质干热岩(HDR)中热能为目标的增强型地热系统(EGS)正逐渐引起世界各国的广泛重视。

[0003] 增强型地热系统发电能量转化率较高且可作为基础负荷长期连续稳定运行。据有关资料显示,欧美等国家自上世纪70年代就开始了干热岩热能利用技术研究,建造了多座实地电站,积累了大量理论和工程经验。其中德国 Landau、美国 Desert Peak 2 等 EGS 项目均已接近商业化,日本等国家甚至已开始试验使用超临界CO₂作为采热工质来获得更好的综合效益。我国地热资源储量极为丰富,但因重视不够,长期以来地热发电发展缓慢,2010年,我国地热发电装机总量甚至不足美国的1%。我国3~10 km干热岩中热能储量多于美国,但国内增强型地热系统在近几年才开始受到关注,技术和理论水平远落后于西方国家。增强型地热系统通过“水力刺激”向岩石中泵入高压冷水来提高渗透率,以增强和创造热干岩中可获取的地热。文献调研表明,在现有的增强型地热系统开采井网部署中,注入水均衡驱替时,井距仅考虑储层渗透率、孔隙度、流体参数之间的关系。在实际储层条件下,不仅存在渗透率的非均质性,也会存在不同注采压差与地层倾角的影响。然而,由于工作制度差异和地层复杂条件,井网部署在仅考虑渗透率下携热工质注入后低温前缘仍无法保证均衡驱替,从而对地热田的热采收率和运行寿命具有显著影响,对于同时考虑渗透率非均质性、不同注采压差和地层倾角下的井网部署缺乏研究。飞行时间在同时考虑渗透率的非均质性、不同注采压差与地层倾角的情况下表征携热工质流动特征,获取地质静态信息和流体动态信息,得到所述目标地热田流线场的数值模拟模型,达到优化井网部署,提高热采收率的效果。

[0004] 注入井与采出井在干热岩储层中的井距关系,会影响携热工质在干热岩中的热提取效果。由于地层条件的差异,携热工质在干热岩储层中的波及范围也不同,进而携热工质在干热岩储层中的热提取效果也不同。目前,对于井网部署的研究较为广泛,但基于飞行时间优化井网部署及施工参数相关研究尚属空白。因此,在渗透率非均质性、不同注采压差与地层倾角同时考虑的情况下对于地热储层的井网部署方面仍需进一步研究,才能更加高效开发与利用我国丰富的地热资源。

[0005] 专利号为CN113987935A的中国专利“一种基于遗传算法的加热井布局优化方法及装置”,公开了一种基于遗传算法的加热井布局优化方法及装置,该方法针对热强化SVE过程中加热井的布局进行优化,减少加热井作用范围的重叠,最大化加热井覆盖的有效面积,

从而达到减少能源浪费,控制温室气体排放的目的。

[0006] 专利号为CN202010577696.X的中国专利“高含水期油藏均衡驱替差异化井距优化方法”,公布了一种高含水期油藏均衡驱替差异化井距优化方法。该发明通过高含水期油藏均衡驱替差异化井距优化方法,基于建立的平面均衡驱替的标准,以油水两相流渗流理论为基础,综合考虑了储层物性及动用程度差异。对井距进行了调整。

[0007] 专利号为CN202010577696.X的中国专利“一种井网布局合理性判断方法及井网布局优化方法”,提供了一种井网布局合理性判断方法及井网布局优化方法。该发明提供的井网布局合理性判断方法适用于页岩油气藏水平井井网布局合理性判断,能够实现立体井网布局的合理性判断,便于实时调整井网布置。

[0008] 上述专利的优化方法相对复杂,而且均未考虑携热工质的飞行时间对最终优化结果的影响。

发明内容

[0009] 本发明旨在提供一种通过渗透率非均质性、不同注采压差与地层倾角间的相互作用来确定飞行时间,并基于飞行时间优化地热田井网布局的方法,意在解决当前开采含倾角的干热岩储层热采收率低的问题。

[0010] 为实现上述发明目的,本发明采用的技术方案如下:一种基于飞行时间优化地热田井网布局的方法,包括以下步骤:

步骤一:基于钻孔岩心温度监测、地质露头考察和地球物理地层预测结果,确定目标深层高温干热岩储层所在地热田工区形状、大小及干热岩储层初始温度,基于物探资料确定注入井的位置与初始注采井距,并基于目标地热田开发现状确定注入携热工质的类型及初始温度。

[0011] 步骤二:根据步骤一所确定的地热田工区形状、大小及干热岩储层初始温度,考虑干热岩储层渗透率平面非均质性及其地层倾角,建立包含地层倾角的渗透率平面非均质地质模型,其中将以水为携热工质的流体从注入井流入采出井之间的时间为飞行时间。

[0012] 步骤三:基于上述构建的多种地质模型,建立考虑不同注采压差条件下的数值模拟模型,通过对考虑干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行数值模拟,得到目标地热田流线场的数值模拟结果。

[0013] 步骤四:基于目标地热田流线场的数值模拟结果和目标储层的孔隙度,获取目标地热田注采井间每个网格对应的飞行时间,公式为:

$$Tof_x = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{x}(s))}{|\vec{v}(\vec{x}(s))|} dx;$$

$$Tof_y = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{y}(s))}{|\vec{v}(\vec{y}(s))|} dy;$$

式中:

Tof_x 为注入井或采出井x方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

Tof_y 为注入井或采出井y方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

$\Phi(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\Phi(\vec{y}(s))$ 为y方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\vec{v}(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的携热工质流动速度,单位m/h。

[0014] 步骤五:通过考虑干热岩储层中发生的多孔介质传热、达西定律以及固体力学之间的相互作用,同时考虑飞行时间,对于构建好的包含考虑不同干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行井距调整。

[0015] 现有技术中,仅考虑渗透率的井距调整公式为:

$$\frac{d_x}{d_y} = \sqrt{\frac{K_x}{K_y}};$$

式中, d_x 为x方向上的井距,单位m; d_y 为y方向上的井距,单位m; K_x 为x方向上的渗透率,单位md; K_y 为y方向上的渗透率,单位md。

[0016] 本发明中,考虑飞行时间的井距调整公式为:

$$\frac{d_x}{d_y} = \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}};$$

式中, Cov_{Tof} 为Tof场空间分布协方差矩阵, Cov_{Tof_x} 为Tof场空间分布协方差矩阵x方向上的特征值, Cov_{Tof_y} 为Tof场空间分布协方差矩阵y方向上的特征值。

[0017] 本发明中,Tof场空间分布协方差矩阵的形式为:

$$Cov_{Tof} = \begin{bmatrix} Cov(Tof_x, Tof_x) & Cov(Tof_x, Tof_y) \\ Cov(Tof_y, Tof_x) & Cov(Tof_y, Tof_y) \end{bmatrix};$$

式中,

$$Cov(Tof_x, Tof_x) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_x, Tof_y) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_x) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_y) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

其中, Tof_x 为注入井或采出井x方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h; Tof_y 为注入井或采出井y方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h; E_x 为 Tof_x 的期望值, E_y 为 Tof_y 的期望值。

[0018] 本发明首先提取Tof场,通过设置阈值,提取采出井附近Tof大于阈值的网格,该网格用来描述Tof场的空间分布情况。针对提取得到的网格,分别计算网格x,y坐标之间的协方差,构造协方差矩阵 Cov_{Tof} ,该矩阵描述了所提取的Tof的空间分布情况。

[0019] 对于Tof场中x方向的特征值 Cov_{Tof_x} ,可通过协方差矩阵 Cov_{Tof} 与x方向Tof的期望值 E_x 来表示,公式为:

$$Cov_{Tof_x} = E_x * Cov_{Tof} ;$$

对于Tof场中y方向的特征值 Cov_{Tof_y} ,可通过协方差矩阵与y方向Tof的期望值 E_y 来表示,公式为:

$$Cov_{Tof_y} = E_y * Cov_{Tof} ;$$

对于井距调整公式,分别使用Tof场分布的协方差矩阵的x方向和y方向特征值,该值反映了Tof场在x和y方向上的变异系数;使用两个参数的比值可以使优化过的井距缩小Tof场在x,y方向上的分布差异。

[0020] 综合考虑渗透率和飞行时间的井距调整公式为:

$$\frac{d_x}{d_y} = \frac{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} * \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}}{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} + \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}} ;$$

式中, d_x 为x方向上的井距,单位m; d_y 为y方向上的井距,单位m; K_x 为x方向上的渗透率,单位md; K_y 为y方向上的渗透率,单位md; Cov_{Tof_x} 为Tof场空间分布协方差矩阵x方向上的特征值, Cov_{Tof_y} 为Tof场空间分布协方差矩阵y方向上的特征值。

[0021] 基于上述井距调整后的数值模拟模型与初始井网布局下的模型进行结果对比,通过采用热采收率作为结果对比的最终目标函数,得到了井距优化调整后模型的热采收率提高程度;其中,热采收率计算公式为:

$$R = \frac{\iiint_{V_s} \rho_s C_{p,s} [T_i - T(t)] dV}{\iiint_{V_s} \rho_s C_{p,s} [T_i - T_m] dV} \times 100\% ;$$

式中, R 为地热田热采收率,无量纲; V_s 为激发的热储体积,单位 m^3 ; T_{in} 为注入携热工质温度,单位 $^{\circ}C$; T_i 为储层的初始温度,单位 $^{\circ}C$; $T(t)$ 为经过时间 t 后储层的温度,单位 $^{\circ}C$, ρ_s 为地热储层岩石密度,单位 kg/m^3 ; $C_{p,s}$ 为地热储层岩石比热容,单位 $J/(K \cdot kg)$ 。

[0022] 本发明相较于现有技术,具有如下优点:

1.本发明首次提出了考虑储层渗透率非均质性的含地层倾角的干热岩储层地质模型在不同注采压差条件下开发深层干热岩储层热能时的井网优化方法,达到了优化井网部署,提高热采收率的效果。

[0023] 2.本发明考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学三种不同物理场间的相互作用,对于干热岩储层数值模拟模型进行逼真细致的描述,更加接近于真实场景下的地质状况,使得模拟结果更加真实可靠。

[0024] 3.本发明通过考虑渗透率非均质性、不同注采压差与地层倾角间的相互作用来确定飞行时间,并基于飞行时间优化地热田井网布局,为干热岩型地热田井网布局提供一种新思路。

附图说明

[0025] 图1为本发明方法的流程图。

[0026] 图2为实施例中的考虑储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型图。

[0027] 图3为实施例初始井网布局图。

[0028] 图4为实施例井网优化后布局图。

具体实施方式

[0029] 实施例1

[0030] 以FL地热田为对象,依据地质资料及测井分析研究表明,该目标区域为干热岩型地热田,研究区形状为正方形,区域范围 $1500 \times 1500\text{m}$,目标储层埋藏深度为 $3000\text{m} \sim 3680\text{m}$;基于物探资料确定注入井的位置,并通过钻孔岩心温度监测、地质露头考察和地球物理地层预测结果显示干热岩储层温度为 $180^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$,选用以 25°C 的常温水为携热工质提取干热岩储层热能。

[0031] 通过上述分析结果对FL地热田进行井网布局优化,具体优化步骤如下:

步骤一:依据上述相关参数得到目标地热田区域范围 $1500 \times 1500\text{m}$,干热岩储层的平均初始温度确定为 200°C ,且以水为携热工质的初始温度为 20°C ,原始井网布局以一注四采为例,初始注采井距为 400m 。

[0032] 步骤二:根据所确定的地热田工区形状、大小及干热岩储层初始温度,考虑干热岩储层渗透率平面非均质性及其地层倾角,建立出地层倾角为 20° 的渗透率非均质地质模型。

[0033] 步骤三:基于上述构建的地质模型,设定初始注采井距为 400m ,注采压差为 120kpa ,构建数值模拟模型;通过对考虑干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行数值模拟,模拟预测年限为30年,得到目标地热田流线场的数值模拟结果。

[0034] 步骤四:基于目标地热田流线场的数值模拟结果和目标储层的孔隙度,获取目标地热田注采井间每个网格对应的飞行时间;下面将以地热田数值模拟模型展开具体实例:

根据数值模拟结果得出,在目标储层中,x轴向方向向量距离上的携热工质流动速度为 1.7m/h ,y轴向方向向量距离上的携热工质流动速度为 1.5m/h ,x轴向方向向量孔隙度均值为 0.23 ,y轴向方向向量孔隙度均值为 0.18 。

[0035] 注采井间每个网格对应的飞行时间,计算公式为:

$$Tof_x = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{x}(s))}{|\vec{v}(\vec{x}(s))|} dx;$$

$$Tof_y = \int_0^r \frac{\Phi(\vec{y}(s))}{|\vec{v}(\vec{y}(s))|} dy;$$

式中:

Tof_x 为注入井或采出井x方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

Tof_y 为注入井或采出井y方向井距离r的流体粒子的飞行时间,单位h;

$\Phi(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\Phi(\vec{y}(s))$ 为y方向向量距离上的孔隙度,无量纲;

$\vec{v}(\vec{x}(s))$ 为x方向向量距离上的携热工质流动速度,单位m/h。

[0036] 根据上述公式可得出,x方向飞行时间为54.13h,y方向飞行时间为48h。

[0037] 步骤五:通过考虑干热岩储层中发生的多孔介质传热、达西定律以及固体力学之间的相互作用,同时考虑飞行时间,对于构建好的包含考虑不同干热岩储层渗透率平面非均质性、地层倾角及注采压差的数值模拟模型进行井距调整。

[0038] 更具体的,根据x方向飞行时间为54.13h,y方向飞行时间为48h,进行数值模拟,得到 Tof 场空间分布协方差矩阵的形式为:

$$Cov_{Tof} = \begin{bmatrix} Cov(Tof_x, Tof_x) & Cov(Tof_x, Tof_y) \\ Cov(Tof_y, Tof_x) & Cov(Tof_y, Tof_y) \end{bmatrix};$$

式中,

$$Cov(Tof_x, Tof_x) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_x, Tof_y) = [Tof_x - E_x(Tof_x)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_x) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_x - E_x(Tof_x)];$$

$$Cov(Tof_y, Tof_y) = [Tof_y - E_y(Tof_y)][Tof_y - E_y(Tof_y)];$$

进而得到 Tof 场中x方向的特征值 Cov_{Tof_x} :

$$Cov_{Tof_x} = E_x * Cov_{Tof};$$

Tof 场中y方向的特征值 Cov_{Tof_y} :

$$Cov_{Tof_y} = E_y * Cov_{Tof};$$

模拟结果为: Cov_{Tof_x} 为1.394, Cov_{Tof_y} 为0.232。

[0039] 综合考虑渗透率和飞行时间的井距调整公式:

$$\frac{d_x}{d_y} = \frac{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} * \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}}{\sqrt{\frac{K_x}{K_y} + \frac{Cov_{Tof_x}}{Cov_{Tof_y}}}};$$

式中, d_x 为x方向上的井距,单位m; d_y 为y方向上的井距,单位m; K_x 为x方向上的渗透率,单位md; K_y 为y方向上的渗透率,单位md; Cov_{Tof_x} 为 Tof 场空间分布协方差矩阵x方向上的特征值, Cov_{Tof_y} 为 Tof 场空间分布协方差矩阵y方向上的特征值;其中,x方向渗透率 K_x 为132md,y方向渗透率 K_y 为59md。

[0040] 由上述公式可知 $d_x/d_y=1.2$,在原始井距400m的基础上,根据 d_x/d_y 与x方向上的飞行时间 Tof_x 与y方向的飞行时间 Tof_y 来进行井距优化。通过数值模拟的流线场模拟结果得出从注入井注入的携热工质经过一定的飞行时间 Tof 后流动前缘在x正方向、x负方向、y正方向、y负方向流线场流动前缘的位置,通过流动前缘的位置来调整井距,确保在经过飞行时间 Tof 后携热工质的流动前缘都能流动到四口采出井。

[0041] 通过上述操作对数值模拟模型中井距的调整得到了四口采出井与注入井距离之间的关系,结果如表1所示。

表1 采出井与注入井优化后井距

| 井名 | 采1井 | 采2井 | 采3井 | 采4井 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 井距/m | 476.6 | 262.7 | 343.2 | 421.8 |

[0043] 基于上述井距调整后的数值模拟模型与初始井网布局下的模型进行结果对比,通过采用热采收率作为结果对比的最终目标函数,得到了井距优化调整后模型的热采收率提高程度。其中,热采收率计算公式为:

$$R = \frac{\iiint_{V_s} \rho_s C_{p,s} [T_i - T(t)] dV}{\iiint_{V_s} \rho_s C_{p,s} [T_i - T_m] dV} \times 100\% ;$$

式中, R 为地热田热采收率,无量纲; V_s 为激发的热储体积,单位 m^3 ; T_{in} 为注入携热工质温度,单位 $^{\circ}C$; T_i 为储层的初始温度,单位 $^{\circ}C$; $T(t)$ 为经过时间 t 后储层的温度,单位 $^{\circ}C$; ρ_s 为地热储层岩石密度,单位 kg/m^3 ; $C_{p,s}$ 为地热储层岩石比热容,单位 $J/(K \cdot kg)$ 。

[0044] 通过数值模拟结果,得出在原始井网部署条件下,经过模拟年限30年后 $T(30y)$ 为 $127.73^{\circ}C$,通过热采收率计算公式得到原始井距下模型的采收率为41.3%;在井距优化调整后的条件下,经过模拟年限30年后 $T(30y)$ 为 $118.28^{\circ}C$,采收率为46.7%。通过采收率对比可知,步骤五中得到的生产井位置坐标可对该目标地热田内的干热岩储层进行更加合理高效的热能开采。

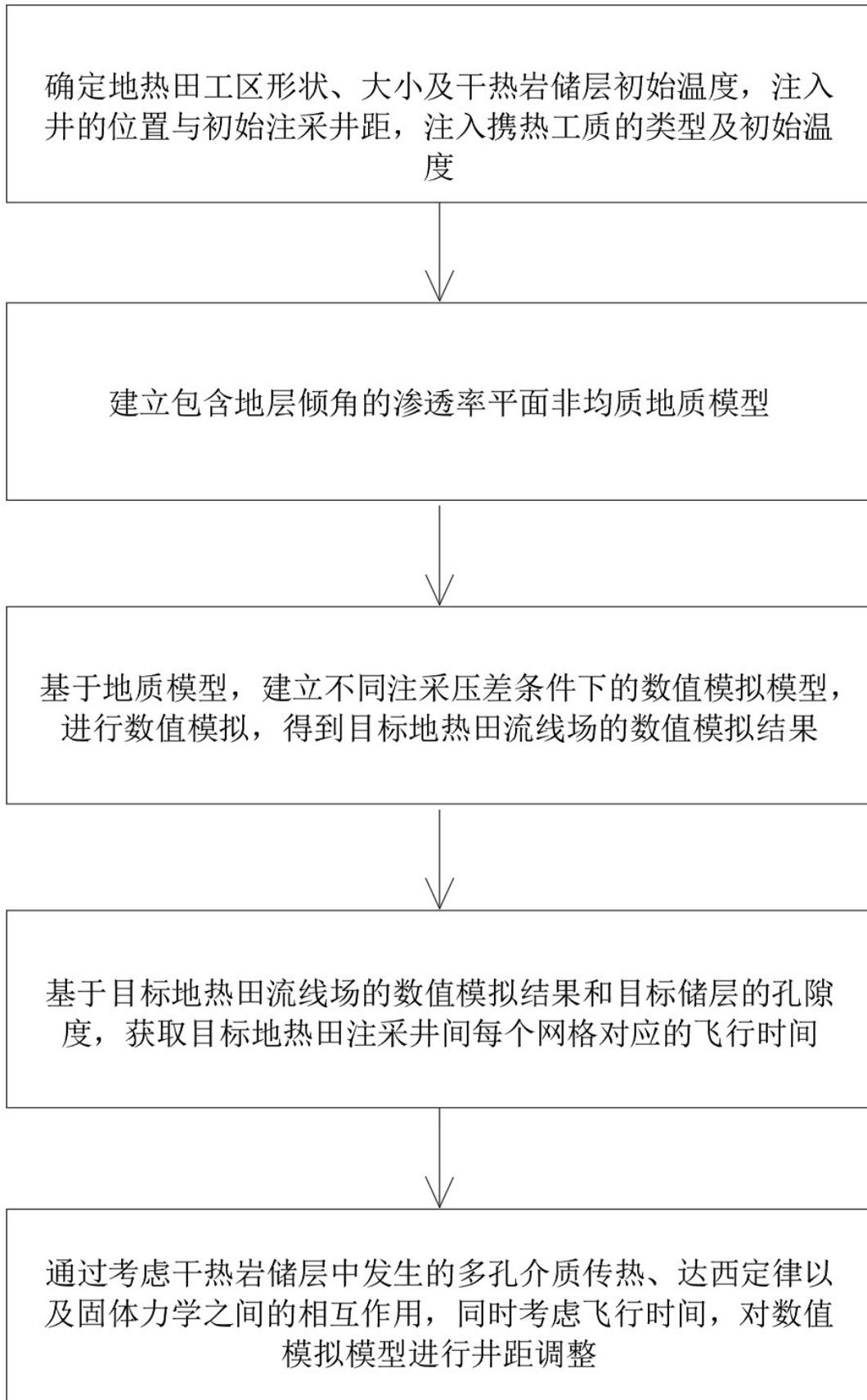


图 1

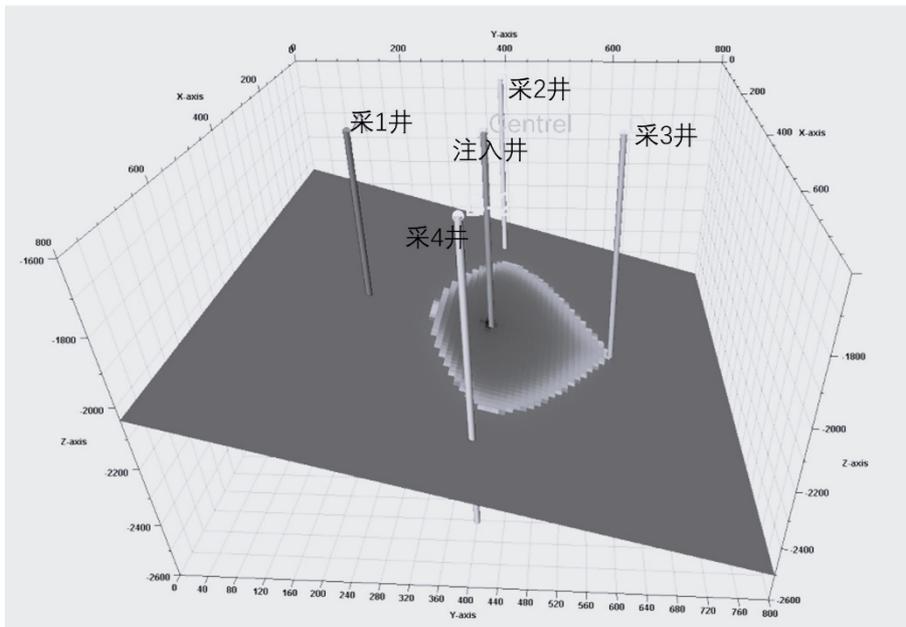


图 2

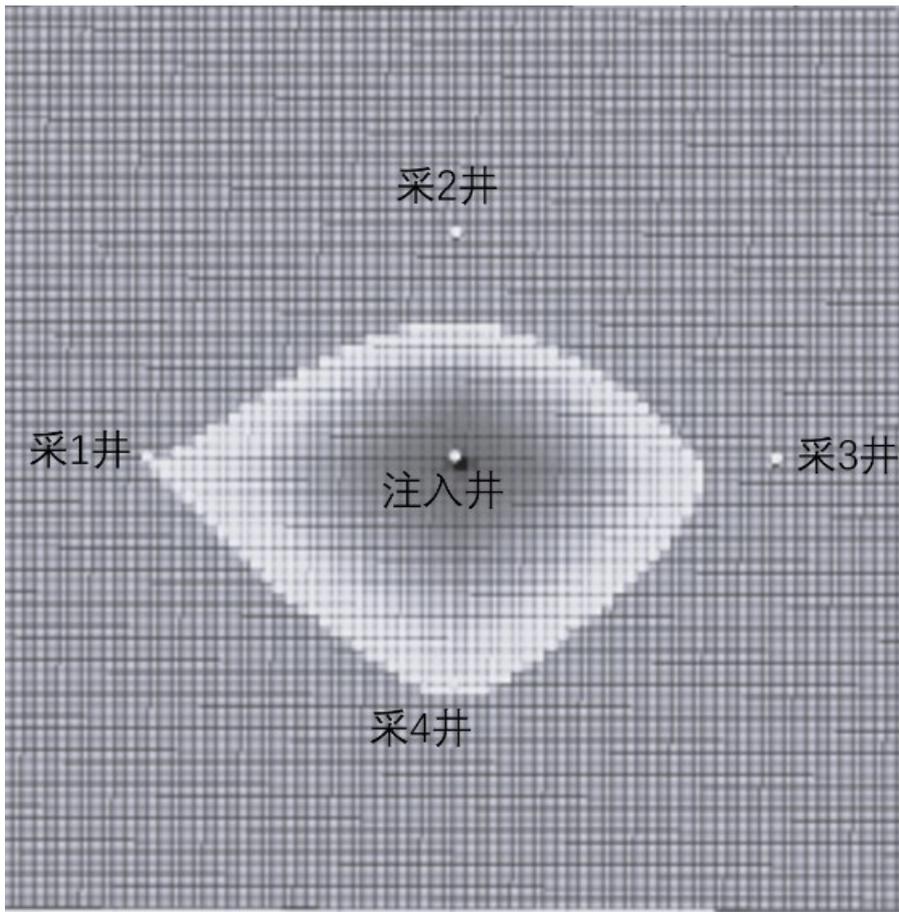


图 3

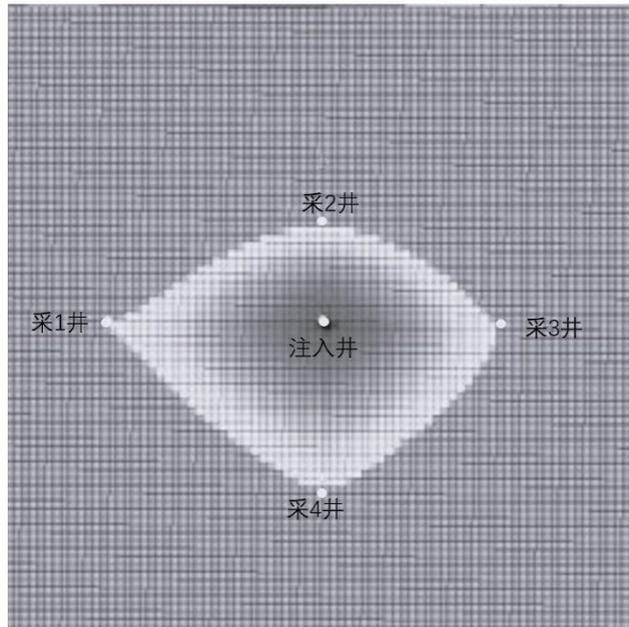


图 4