



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116341195 A

(43) 申请公布日 2023.06.27

(21) 申请号 202310082531.9

G06F 113/08 (2020.01)

(22) 申请日 2023.02.08

G06F 119/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(71) 申请人 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

(72) 发明人 李昕睿 孙致学 宋文铜 付水青 徐一凡

(74) 专利代理机构 重庆晟轩知识产权代理事务所(普通合伙) 50238

专利代理师 王海凤

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

E21B 43/00 (2006.01)

E21B 49/00 (2006.01)

G06F 17/11 (2006.01)

权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法

(57) 摘要

本发明涉及深层地热能开发的技术领域,具体涉及了一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法,包括以下步骤:构建离散裂缝网络模型,考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学即热-流-固物理场,对于所述离散裂缝网络模型进行修订;对于修订后的离散裂缝网络模型分别采用上注下采、下注上采、同层注采三种不同注采方式分别进行模拟;根据生产井产水温度与携热工质的注入速度、注入温度及生产压差之间的关系,选取裂缝-基岩互层发育热储的最优注采方式和注采参数。本发明通过建立离散裂缝网络模型对干热岩储层进行逼真细致的描述,更加接近于真实场景下的干热岩储层,使得模拟结果更加真实可靠。



1. 一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法,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、钻孔岩心裂缝描述和地球物理裂缝预测结果,确定深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式;

步骤二:根据步骤一所得的深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式,领域现有软件建立深层高温干热岩储层的离散裂缝网络模型,其中裂缝层与基岩层纵向多层叠置发育。

步骤三:考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学即热-流-固物理场,对于所述离散裂缝网络模型进行修订,修订过程如下:

上述离散裂缝网络模型中携热工质的流动以质量守恒定律(2-1)来描述:

$$\frac{\partial(\varepsilon_p \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = Q_m \quad (2-1)$$

其中 ρ_f 为携热工质的密度, ε_p 为深层高温干热岩的孔隙度, t 为模拟时间, Q_m 为深层高温干热岩中的质量源, u 为携热工质在深层高温干热岩中的流速;

携热工质的运动用达西定律(3-1)来描述:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla z) \quad (3-1)$$

其中 κ 为深层高温干热岩的渗透率, μ 为携热工质的粘度, ∇p 为压力梯度, ∇z 为深层高温干热岩储层深度梯度。

离散裂缝网络模型中多孔介质传热过程以能量守恒方程(4-1)描述:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \nabla T) = 0 \quad (4-1)$$

其中, $(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon_p \rho_f + (1 - \varepsilon_p) \rho_s C_s$, $\lambda_{eff} = \varepsilon_p \lambda_f + (1 - \varepsilon_p) \lambda_s$ 。 $(\rho C_p)_{eff}$ 和 λ_{eff} 分别为通过体积平均得到的有效热容和有效导热系数, T 为深层高温干热岩的储层温度, ρ 为深层高温干热岩的密度, C 为比热容, λ 为导热系数,下标“s”和“f”分别表示固相和液相; C_p 为深层高温干热岩的恒压比热容, $C_{p,f}$ 为深层高温干热岩内携热工质的比热容, ∇T 表示深层高温干热岩的温度梯度;

深层高温干热岩的力学变形基于热-孔-弹性原理,通过综合热膨胀和孔隙加压的效果,得出矩阵变形的控制方程(5-1)为:

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \alpha_B p \delta_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{ki} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} - \frac{E}{(1-2\nu)} \alpha_T \Delta T \delta_{ij} \quad (5-1)$$

其中 σ'_{ij} 是有效应力, σ_{ij} 为法相压应力, ε_{ij} 是应变, E 是杨氏模量, ν 是泊松比, α_B 是比奥系数, p 是携热工质压力, δ_{ij} 是克罗内克函数, α_T 是热膨胀系数, ΔT 是温度增量, $\Delta T = T - T_{ref}$, T 和 T_{ref} 分别是深层高温干热岩温度和注入携热工质的初始参考温度;

深层高温干热岩的温度场方程(6-1)为:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_s + W \quad (6-1)$$

式中, ρ_s 为深层高温干热岩密度; λ_s 为深层高温干热岩的热传导系数; C_s 为深层高温干热岩比热容; ∇^2 为拉普拉斯算子,是梯度的散度; T_s 为深层高温干热岩表面温度; W 为热源。

裂缝水温度场方程(7-1):

$$d_f \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + d_f \rho_f C_f u_f \nabla_\tau T_f = d_f \nabla_\tau \cdot (\lambda_f \nabla_\tau T_f) + W_f \quad (7-1)$$

式中, d_f 为裂缝开度; ρ_f 为携热工质的密度; C_f 为携热工质的比热容; T_f 为携热工质的温度; u_f 为携热工质的流速; λ_f 为携热工质的热传导系数; ∇_τ 为沿裂缝切向求导; u_f 为裂缝内携热工质的流速; T_f 为裂缝内携热工质的温度; W_f 为裂缝表面的携热工质从深层高温干热岩吸收的热量;

裂缝内携热工质与深层高温干热岩的热交换服从牛顿换热公式, 携热工质和深层高温干热岩在边界处的换热量用对流传热系数计算, 即认为裂缝内携热工质的平均温度与深层高温干热岩表面温度不同, 单位面积上从深层高温干热岩传给裂隙内携热工质的热量(8-1)为:

$$W_f = h(T_s - T_f) \quad (8-1)$$

式中, h 为换热系数, T_s 为深层高温干热岩表面温度。

步骤四: 对于步骤三修订后的离散裂缝网络模型分别采用上注下采、下注上采、同层注采三种不同注采方式分别进行模拟;

步骤五: 对于修订后的离散裂缝网络模型采用步骤四提出的三种注采方式, 对于每一种注采方式通过改变携热工质的注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 及生产压差 ΔP , 由数值模拟方法得到生产井产水温度在开采时间内随 q_{inj} 、 T_{inj} 及 ΔP 变化的结果, 以深层高温干热岩热能的开采时间为横坐标, 生产井产水温度为纵坐标, 绘制生产井出口端携热工质的温度变化曲线, 即得生产井出口端携热工质温度 T_{out} 的变化规律;

步骤六: 设置注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 和生产压差 ΔP 施工参数不同取值, 应用正交实验方法建立 N 套施工参数组合试验方案;

根据步骤五所述的方法, 得到 N 条生产井产水温度变化曲线, 应用极差分析方法对 N 条生产井产水温度变化曲线进行分析, 选择最优的一条生产井产水温度变化曲线, 根据最优生产井产水温度变化曲线代表的工艺参数对目标干热岩储层进行热能开采。

2. 如权利要求1所述的深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法, 其特征在于: 所述步骤二建立的离散裂缝网络模型时, 将裂缝视作无厚度的线性单元, 深层高温干热岩利用实体单元离散, 其中, 裂缝网络的裂缝长度分布通常采用幂律分布模型, 裂缝数量与长度的关系表示为(1-1):

$$n(l, L) = \alpha L^D l^{-\alpha}, l \in [l_{min}, l_{max}] \quad (1-1)$$

式中, L 为域的大小; l 为裂缝长度; $n(l, L)$ 为边长为 L 的正方形储层内裂缝长度 l 在 $[l, l + dl]$ ($dl \ll l$) 内的裂缝数量; D 为分形维数; α 为裂缝长度指数; α 为与裂缝密度相关的常数; l_{max} 和 l_{min} 分别为正方形储层内裂缝长度的最大值和最小值。

一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法

技术领域

[0001] 本发明涉及深层地热能开发技术领域,具体涉及一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法。

背景技术

[0002] 干热岩(HDR)是一种重要的地热资源,一般是指埋藏于地下3~10km处,不含或含有少量流体且温度高于180℃的高温岩体,其中储存的热量约占地热能总量的90%以上。

[0003] 增强型地热系统(EGS)是通过向深层高温干热岩储层注入低温携热工质,通过工质在注采井之间流动,从而实现地热能的开采与利用。低温携热工质与深层高温岩体接触发生热交换,由于干热岩储层温度较高,热量会从温度高的干热岩岩体传向温度低的携热工质,从而使得注入的携热工质通过热交换而升温。深层地热能提取涉及到裂缝岩体内水动力场、应力场以及温度场的复杂时空演化规律,即热-流-固耦合问题。这种方法全面考虑了场与场之间的耦合效应,更接近于真实情况下的干热岩储层地质状况。由于地质运动、原地应力条件、岩矿学及岩体可压裂性等差异,在热储场地尺度下热储层岩体表现出强烈的储渗空间非均质性。文献调研表明,现有深层地热能开发方式和施工参数优化均基于单一裂缝地质模型或单一基岩地质模型,裂缝特征参数时进行了均质等效,难以体现出裂缝系统密度、产状及空间连通关系对携热工质的热交换效果的影响。基于裂缝-基岩共生系统的互层地质模型的深层地热能开发方式论证未见公开报道。然而,由于岩体天然及人工裂缝的复杂性,平面上,低温携热工质注入后将沿缝网优势方方位突进发育;纵向上,高导流能力的裂缝层和致密基岩层互层发育,携热工质注入后低温前缘呈指进突破,从而对地热田的热采收率和运行寿命具有显著影响,对于不同注采方式的开采方法及干热岩储层裂缝纵向互层叠置发育缺乏研究。

[0004] 注入井与生产井在干热岩储层中的相互关系,会影响携热工质在干热岩中的热提取效果。由于注采方式的不同,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,对于井的类型研究较为广泛,但基于裂缝-基岩互层叠置地热储层的注采方式及施工参数相关研究尚属空白。因此,对于地热储层的多物理场及裂缝互层叠置发育在不同注采方式下的开发效果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CN112984849B的中国专利“寒武系岩溶热储和变质岩地层裂缝型热储地热开发方法”,公布了一种寒武系岩溶热储和变质岩地层裂缝型热储地热开发方法。主要解决目前在开发地热过程中,浅部岩溶热储采热温度低,对居民生活用水产生影响,未实现100%回灌等技术问题。

[0006] 专利号为CN115573692A的中国专利“干热岩人工热储层构造系统及方法”,公布了一种干热岩人工热储层构造系统及方法。构造了垂向的裂隙系统,使得地层压裂难度小,压裂范围广。

[0007] 专利号为CN114429011A的中国专利“干热岩热储压裂裂缝换热总面计算方法、装

置及介质”，公布了干热岩热储压裂裂缝换热总面计算方法、装置及介质。该发明建立了地面系统发电量与地下热储压裂人工裂缝参数之间的关系。该专利并未涉及考虑裂缝层-基岩层纵向非均质性以及多物理场耦合的地热资源开发技术。

[0008] 上述专利均未考虑储渗空间的非均质性，未能对裂缝系统几何形态进行真实有效的描述。

发明内容

[0009] 本发明旨在提供一种考虑多物理场间相互作用、裂缝层纵向叠置发育及不同注采方式的干热岩热能开采方法，意在解决当前深层裂缝-基岩互层型干热岩储层热能开采方法缺失问题。

[0010] 为实现上述发明目的，本发明采用的技术方案如下：一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法，包括以下步骤：

[0011] 步骤一：基于钻孔岩心温度监测、地质露头考察、钻孔岩心裂缝描述和地球物理裂缝预测结果，确定深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式。

[0012] 步骤二：根据步骤一所得的深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式，领域现有软件建立深层高温干热岩储层的离散裂缝网络模型，其中裂缝层与基岩层纵向多层叠置发育。

[0013] 步骤三：考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学即热-流-固物理场，对于所述离散裂缝网络模型进行修订，修订过程如下：

[0014] 上述离散裂缝网络模型中携热工质的流动以质量守恒定律(2-1)来描述：

$$[0015] \quad \frac{\partial(\varepsilon_p \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = Q_m \quad (2-1)$$

[0016] 其中 ρ_f 为携热工质的密度， ε_p 为深层高温干热岩的孔隙度， t 为模拟时间， Q_m 为深层高温干热岩中的质量源， u 为携热工质在深层高温干热岩中的流速；

[0017] 携热工质的运动用达西定律(3-1)来描述：

$$[0018] \quad u = -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla z) \quad (3-1)$$

[0019] 其中 k 为深层高温干热岩的渗透率， μ 为携热工质的粘度， ∇p 为压力梯度， ∇z 为深层高温干热岩储层深度梯度。

[0020] 离散裂缝网络模型中多孔介质传热过程以能量守恒方程(4-1)描述：

$$[0021] \quad (\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \nabla T) = 0 \quad (4-1)$$

[0022] 其中， $(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon_p \rho_f + (1 - \varepsilon_p) \rho_s C_s$ ， $\lambda_{eff} = \varepsilon_p \lambda_f + (1 - \varepsilon_p) \lambda_s$ 。 $(\rho C_p)_{eff}$ 和 λ_{eff} 分别为通过体积平均得到的有效热容和有效导热系数， T 为深层高温干热岩的储层温度， ρ 为深层高温干热岩的密度， C 为比热容， λ 为导热系数，下标“s”和“f”分别表示固相和液相； C_p 为深层高温干热岩的恒压比热容， $C_{p,f}$ 为深层高温干热岩内携热工质的比热容， ∇T 表示深层高温干热岩的温度梯度；

[0023] 深层高温干热岩的力学变形基于热-孔-弹性原理，通过综合热膨胀和孔隙加压的效果，得出矩阵变形的控制方程(5-1)为：

$$[0024] \quad \sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \alpha_B p \delta_{ij} = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{ki} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} - \frac{E}{(1-2\nu)} \alpha_T \Delta T \delta_{ij} \quad (5-1)$$

[0025] 其中 σ'_{ij} 是有效应力, σ_{ij} 为法相压应力, ε_{ij} 是应变, E 是杨氏模量, ν 是泊松比, α_B 是比奥系数, p 是携热工质压力, δ_{ij} 是克罗内克函数, α_T 是热膨胀系数, ΔT 是温度增量, $\Delta T = T - T_{ref}$, T 和 T_{ref} 分别是深层高温干热岩温度和注入携热工质的初始参考温度;

[0026] 深层高温干热岩的温度场方程(6-1)为:

$$[0027] \quad c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_s + W \quad (6-1)$$

[0028] 式中, ρ_s 为深层高温干热岩密度; λ_s 为深层高温干热岩的热传导系数; c_s 为深层高温干热岩比热容; ∇^2 为拉普拉斯算子, 是梯度的散度; T_s 为深层高温干热岩表面温度; W 为热源。

[0029] 裂缝水温度场方程(7-1):

$$[0030] \quad d_f \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + d_f \rho_f C_f u_f \nabla_\tau T_f = d_f \nabla_\tau \cdot (\lambda_f \nabla_\tau T_f) + W_f \quad (7-1)$$

[0031] 式中, d_f 为裂缝开度; ρ_f 为携热工质的密度; C_f 为携热工质的比热容; T_f 为携热工质的温度; u_f 为携热工质的流速; λ_f 为携热工质的热传导系数; ∇_τ 为沿裂缝切向求导; u_f 为裂缝内携热工质的流速; T_f 为裂缝内携热工质的温度; W_f 为裂缝表面的携热工质从深层高温干热岩吸收的热量。

[0032] 裂缝内携热工质与深层高温干热岩的热交换服从牛顿换热公式, 携热工质和深层高温干热岩在边界处的换热量用对流传热系数计算, 即认为裂缝内携热工质的平均温度与深层高温干热岩表面温度不同, 单位面积上从深层高温干热岩传给裂隙内携热工质的热量(8-1)为:

$$[0033] \quad W_f = h(T_s - T_f) \quad (8-1)$$

[0034] 式中, h 为换热系数, T_s 为深层高温干热岩表面温度。

[0035] 步骤四: 对于步骤三修订后的离散裂缝网络模型分别采用上注下采、下注上采、同层注采三种不同注采方式分别进行模拟。

[0036] 步骤五: 对于修订后的离散裂缝网络模型采用步骤四提出的三种注采方式, 对于每一种注采方式通过改变携热工质的注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 及生产压差 ΔP , 由数值模拟方法得到生产井产水温度在开采时间内随 q_{inj} 、 T_{inj} 及 ΔP 变化的结果, 以深层高温干热岩热能的开采时间为横坐标, 生产井产水温度为纵坐标, 绘制生产井出口端携热工质的温度变化曲线, 即得生产井出口端携热工质温度 T_{out} 的变化规律。

[0037] 步骤六: 设置注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 和生产压差 ΔP 施工参数不同取值, 应用正交实验方法建立 N 套施工参数组合试验方案;

[0038] 根据步骤五所述的方法, 得到 N 条生产井产水温度变化曲线, 应用极差分析方法对 N 条生产井产水温度变化曲线进行分析, 选择最优的一条生产井产水温度变化曲线, 根据最优生产井产水温度变化曲线代表的工艺参数对目标干热岩储层进行热能开采。

[0039] 作为优选, 所述步骤二建立的离散裂缝网络模型时, 将裂缝视作无厚度的线性单元, 深层高温干热岩利用实体单元离散, 其中, 裂缝网络的裂缝长度分布通常采用幂律分布模型, 裂缝数量与长度的关系表示为(1-1):

$$[0040] \quad n(l, L) = \alpha L^D l^{-\alpha}, l \in [l_{\min}, l_{\max}] \quad (1-1)$$

[0041] 式中, L 为域的大小; l 为裂缝长度; $n(l, L)$ 为边长为 L 的正方形储层内裂缝长度 l 在 $[l, l+d1]$ ($d1 \ll 1$)内的裂缝数量; D 为分形维数; α 为裂缝长度指数; α 为与裂缝密度相关的常数; l_{\max} 和 l_{\min} 分别为正方形储层内裂缝长度的最大值和最小值。

[0042] 本发明相较于现有技术方法, 具有如下优点:

[0043] 1. 本发明充分讨论了不同注采方式开发深层干热岩储层热能的优缺点, 并结合生产井产水温度优化合理注采参数, 为后续深层干热岩储层热能开发提供了一种新思路。

[0044] 2. 本发明考虑热-流-固三种不同物理场间的相互作用, 解决了深层干热岩储层开发的痛点与难点, 实现了干热岩注采方式优化的研究。

[0045] 3. 本发明通过建立离散裂缝网络模型对干热岩储层进行逼真细致的描述, 更加接近于真实场景下的干热岩储层, 使得模拟结果更加真实可靠。

附图说明

[0046] 图1为本发明方法的流程图。

[0047] 图2为上注下采方式的裂缝-基岩互层型干热岩地质模型。

[0048] 图3为下注上采方式的裂缝-基岩互层型干热岩地质模型。

[0049] 图4为同层注采方式的裂缝-基岩互层型干热岩地质模型。

[0050] 图5为实施例中三种注采方式分别在开采20年后生产井产水温度关系图。

[0051] 图6为实施例中携热工质不同质量流速下以同层注采方式开采20年后生产井产水温度关系图。

[0052] 图7为实施例中携热工质不同注入温度下以同层注采方式开采20年后生产井产水温度关系图。

[0053] 图8为实施例中不同生产压差下以同层注采方式开采20年后生产井产水温度关系图。

具体实施方式

[0054] 下面结合附图对本发明方案进行详细阐述。

[0055] 参见图1-图4, 一种深层裂缝-基岩互层型干热岩热能开采方法, 包括以下步骤:

[0056] 步骤一: 基于钻孔岩心温度监测、地质露头考察、钻孔岩心裂缝描述和地球物理裂缝预测结果, 确定深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式; 本步骤通过钻孔岩心温度监测、地质露头考察、钻孔岩心裂缝描述和地球物理裂缝预测结果来确定深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式属于现有技术, 另外, 本发明中的深层高温干热岩即指深层裂缝-基岩互层型干热岩。

[0057] 步骤二: 根据步骤一所得的深层高温干热岩储层的储层温度和储层中裂缝的分布状态及分布形式, 领域现有软件建立深层高温干热岩储层的离散裂缝网络模型, 其中裂缝层与基岩层纵向多层叠置发育。裂缝将以实际情况刻画其位置、走向和开度, 即以离散裂缝方法表示; 使用Matlab软件建立深层高温干热岩储层的离散裂缝网络模型。

[0058] 步骤三: 考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学即热-流-固物理场, 对于所述离散裂缝网络模型进行修订, 修订过程如下: 该离散裂缝网络模型将以水为携热工质与该

模型建立的岩石基质进行热交换,从而提取热量。

[0059] 上述离散裂缝网络模型中携热工质的流动以质量守恒定律(2-1)来描述:

$$[0060] \quad \frac{\partial(\varepsilon_p \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = Q_m \quad (2-1)$$

[0061] 其中 ρ_f 为携热工质的密度, ε_p 为深层高温干热岩的孔隙度, t 为模拟时间, Q_m 为深层高温干热岩中的质量源, u 为携热工质在深层高温干热岩中的流速;

[0062] 携热工质的运动用达西定律(3-1)来描述:

$$[0063] \quad u = -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla z) \quad (3-1)$$

[0064] 其中 k 为深层高温干热岩的渗透率, μ 为携热工质的粘度, ∇p 为压力梯度, ∇z 为深层高温干热岩储层深度梯度。

[0065] 离散裂缝网络模型中多孔介质传热过程以能量守恒方程(4-1)描述:

$$[0066] \quad (\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \nabla T) = 0 \quad (4-1)$$

[0067] 其中, $(\rho C_p)_{eff} = \varepsilon_p \rho_f + (1 - \varepsilon_p) \rho_s C_s$, $\lambda_{eff} = \varepsilon_p \lambda_f + (1 - \varepsilon_p) \lambda_s$ 。 $(\rho C_p)_{eff}$ 和 λ_{eff} 分别为通过体积平均得到的有效热容和有效导热系数, T 为深层高温干热岩的储层温度, ρ 为深层高温干热岩的密度, C 为比热容, λ 为导热系数,下标“s”和“f”分别表示固相和液相; C_p 为深层高温干热岩的恒压比热容, $C_{p,f}$ 为深层高温干热岩内携热工质的比热容, ∇T 表示深层高温干热岩的温度梯度。

[0068] 深层高温干热岩的力学变形基于热-孔-弹性原理,通过综合热膨胀和孔隙加压的效果,得出矩阵变形的控制方程(5-1)为:

$$[0069] \quad \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_B p \delta_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{ki} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} - \frac{E}{(1-2\nu)} \alpha_T \Delta T \delta_{ij} \quad (5-1)$$

[0070] 其中 σ'_{ij} 是有效应力, σ_{ij} 为法相压应力, ε_{ij} 是应变, E 是杨氏模量, ν 是泊松比, α_B 是比奥系数, p 是携热工质压力, δ_{ij} 是克罗内克函数, α_T 是热膨胀系数, ΔT 是温度增量, $\Delta T = T - T_{ref}$, T 和 T_{ref} 分别是深层高温干热岩温度和注入携热工质的初始参考温度。

[0071] 深层高温干热岩的温度场方程(6-1)为:

$$[0072] \quad c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T_s + W \quad (6-1)$$

[0073] 式中, ρ_s 为深层高温干热岩密度; λ_s 为深层高温干热岩的热传导系数; C_s 为深层高温干热岩比热容; ∇^2 为拉普拉斯算子,是梯度的散度; T_s 为深层高温干热岩表面温度; W 为热源。

[0074] 裂缝水温度场方程(7-1):

$$[0075] \quad d_f \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + d_f \rho_f C_f u_f \nabla_\tau T_f = d_f \nabla_\tau \cdot (\lambda_f \nabla_\tau T_f) + W_f \quad (7-1)$$

[0076] 式中, d_f 为裂缝开度; ρ_f 为携热工质的密度; C_f 为携热工质的比热容; T_f 为携热工质的温度; u_f 为携热工质的流速; λ_f 为携热工质的热传导系数; ∇_τ 为沿裂缝切向求导; u_f 为裂缝内携热工质的流速; T_f 为裂缝内携热工质的温度; W_f 为裂缝表面的携热工质从深层高温干

热岩吸收的热量;第二项“ $d_f \rho_f C_f u_f \nabla T_f$ ”表示裂缝内携热工质对温度场的对流作用。

[0077] 裂缝内携热工质与深层高温干热岩的热交换服从牛顿换热公式,携热工质和深层高温干热岩在边界处的换热量用对流传热系数计算,即认为裂缝内携热工质的平均温度与深层高温干热岩表面温度不同,单位面积上从深层高温干热岩传给裂隙内携热工质的热量(8-1)为:

$$[0078] \quad W_f = h(T_s - T_f) \quad (8-1)$$

[0079] 式中, h 为换热系数, T_s 为深层高温干热岩表面温度。

[0080] 步骤四:受空间非均质性及裂缝高导流效应影响,裂缝层-基岩层互层发育的深层高温干热岩储层注采取热时,低温携热工质前缘在平面和纵向上非均匀推进造成部分生产井段过早突破从而影响采热效率。针对该工程难题,基于步骤三所构建的离散裂缝网络模型,对于步骤三修订后的离散裂缝网络模型分别采用上注下采、下注上采、同层注采三种不同注采方式分别进行模拟;以三层裂缝叠置发育为例,将裂缝层分为上、中、下三层,三种不同注采方式分别为:上注下采、下注上采和同层注采。其中,上注下采以上部裂缝层左端为注入端即注入井,下部裂缝层右端为出口端即生产井;下注上采模型以上部裂缝层右端为出口端即生产井,下部裂缝层左端为注入端即注入井;同层注采模型以干热岩储层左端即上、中、下三层裂缝的左端以及储层基质岩体的左端设为注入端即注入井,将其右端设为出口端即生产井。

[0081] 步骤五:对于修订后的离散裂缝网络模型采用步骤四提出的三种注采方式,对于每一种注采方式通过改变携热工质的注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 及生产压差 ΔP ,由数值模拟方法得到生产井产水温度在开采时间内随 q_{inj} 、 T_{inj} 及 ΔP 变化的结果,以深层高温干热岩热能的开采时间为横坐标,生产井产水温度为纵坐标,绘制生产井出口端携热工质的温度变化曲线,即得生产井出口端携热工质温度 T_{out} 的变化规律;即对于一种注采方式,将注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 及生产压差 ΔP 作为修订后的离散裂缝网络模型的输入,修订后的离散裂缝网络模型的输出即是该种注采方式下生产井产水温度,不断改变 q_{inj} 、 T_{inj} 及 ΔP ,得到对应的生产井产水温度,然后根据所得生产井产水温度绘制生产井出口端携热工质的温度变化曲线;对于另外两种注采方式采用相同方法进行。

[0082] 根据目标干热岩储层的初始温度、热储厚度、叠置层数、裂缝密度和注采井距,主要针对注入井和生产井两个方面对施工参数进行优化,对于注入井待优化参数为注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} ,对于生产井主要优化生产压差 ΔP 。最后,以生产井产水温度 T_{out} 作为地热开发效果优劣的评价指标。

[0083] 步骤六:设置注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 和生产压差 ΔP 施工参数不同取值,应用正交实验方法建立N套施工参数组合试验方案。

[0084] 根据步骤五所述的方法,得到N条生产井产水温度变化曲线,应用极差分析方法对N条生产井产水温度变化曲线进行分析,选择最优的一条生产井产水温度变化曲线,根据最优生产井产水温度变化曲线代表的工艺参数对目标干热岩储层进行热能开采。

[0085] 具体的,所述步骤二建立的离散裂缝网络模型时,将裂缝视作无厚度的线性单元,深层高温干热岩利用实体单元离散,其中,裂缝网络的裂缝长度分布通常采用幂律分布模型,裂缝数量与长度的关系表示为(1-1):

$$[0086] \quad n(l, L) = \alpha L^D l^{-a}, l \in [l_{\min}, l_{\max}] \quad (1-1)$$

[0087] 式中, L 为域的大小; l 为裂缝长度; $n(l, L)$ 为边长为 L 的正方形储层内裂缝长度 l 在 $[l, l+d_1]$ ($d_1 \ll l$) 内的裂缝数量; D 为分形维数; α 为裂缝长度指数; α 为与裂缝密度相关的常数; l_{\max} 和 l_{\min} 分别为正方形储层内裂缝长度的最大值和最小值。

[0088] 实施例1:

[0089] 以中非乍得Bangor盆地H区块花岗岩潜山地热田为对象,根据地震解释、测井分析及地质综合研究表明,目标热储为花岗岩质裂缝性潜山干热岩储层,热储埋深范围2800m至3340m,裂缝层与基岩层由不整合面至潜山内幕呈互层发育,为典型的裂缝-基岩互层型热储,纵向非均质性极强。钻井温度实测及岩心描述显示,干热岩储层井底温度为 $260^{\circ}\text{C} \sim 290^{\circ}\text{C}$,裂缝平均长度为12米,裂缝倾角为 $20^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。该地热田中干热岩储层裂缝分层叠置发育,其裂缝层分为上、中、下三层。

[0090] 通过上述分析结果对中非乍得Bangor盆地H区块花岗岩潜山地热田进行地热开采,具体开采步骤如下:

[0091] 步骤一:依据上述干热岩储层的相关参数,采用数值模拟方法建立离散裂缝网络模型,模型长度为3000m,宽度1240m。裂缝平均长度8米,裂缝倾角为 $20^{\circ} \sim 80^{\circ}$,均值为 65° ,裂缝层分为上、中、下三层。探测表明,干热岩储层初始温度为 270°C ,则以初始温度为 20°C 的水为低温携热工质对该干热岩储层进行热能提取。

[0092] 步骤二:针对上述裂缝层与基岩层纵向叠置的物理模型考虑多孔介质传热、达西定律以及固体力学。

[0093] 步骤三:分别采用上注下采、下注上采和同层注采三种注采方式,以上述离散裂缝网络模型为基础,建立不同的注采方式模型。三种注采方式均预测20年采热年限下,生产井产水温度 T_{out} 如图5,温度越高则携热工质与高温岩体换热越充分,采热效果越好。由图5可知,上注下采模型在运行20年后生产井产水温度为293.45K,下注上采模型在运行20年后生产井产水温度为294.56K,同层注采模型在运行20年后生产井产水温度为297.05K。由此,该干热岩储层适用于同层注采的开发方式,即注入井位于干热岩储层一端,此处设为左端,生产井位于干热岩储层另一端,此处设为右端。

[0094] 步骤四:基于步骤三所优选的同层注采方式开发该干热岩储层,设定干热岩储层的开采年限为20年,分别以 1kg/s 、 5kg/s 、 10kg/s 的质量流速注入温度为 20°C 的携热工质,通过数值模拟方法,在注采压差为5MPa时得到不同注入速度下,携热工质在开采年限为20年时生产井出口端携热工质的温度变化曲线(图6)。在其余参数相同,携热工质的质量流速为 8kg/s ,且注采压差为5MPa时,改变携热工质的注入温度分别为 10°C 、 15°C 、 20°C ,通过数值模拟方法,得到在不同携热工质的注入温度下,生产井出口端温度变化曲线(图7)。在与上述其余条件相同情况下,携热工质的注入温度为 20°C ,且携热工质的质量流速为 8kg/s 时,以4MPa、6MPa、8MPa的生产压差对此干热岩储层进行热能开采。通过数值模拟方法,得到不同压差下,生产井出口端在20年内携热工质的温度变化曲线(图8)。

[0095] 步骤五:依据上述数值模拟结果得到的生产井出口端携热工质的温度与携热工质的注入速度 q_{inj} 、注入温度 T_{inj} 及生产压差 ΔP 之间的关系曲线,图6表明,若以 $T_{\text{out}} > 393.15\text{K}$ 为生产指标,则携热工质的质量流速为 1kg/s 、 5kg/s 和 10kg/s 时,该系统的运行寿命分别为9年、7年和5年,质量流速为 1kg/s 的系统运行寿命比质量流速为 10kg/s 的系统运行寿命延长了4年,且携热工质的质量流速为 1kg/s 时,系统在任意时刻生产井产水温度比其余两种

类型的生产井产水温度高。由图7可知,携热工质在注入温度分别为10℃、15℃及20℃时,该系统的运行寿命分别为5年、7年和8年,则当携热工质的注入温度为20℃时,该系统运行寿命最长,且在开采20年后生产井产水温度相较于其余两种类型最高。由图8表明,在生产压差为4MPa、6MPa及8MPa下,该系统的运行寿命分别为8年、6年和4年,即当生产井的生产压差为4MPa时,该系统运行寿命最长为8年,并且在该生产压差下生产井产水温度在开采20年后相较于生产压差为6MPa和8MPa时的温度高。

[0096] 则由上述结果表明,当携热工质的注入速度为1kg/s,携热工质的注入温度为20℃,生产井的生产压差为4MPa时,该裂缝-基岩互层型干热岩储层的热能提取效果最好,上述参数即为该花岗岩潜山地热田的最优注采参数。

[0097] 上述实施案例仅用于说明本发明,其中实施步骤及相关参数都可有所变化,凡是在本发明技术方案的基础上进行的等同变换和改进,均不应排除在本发明的保护范围之外。



图1

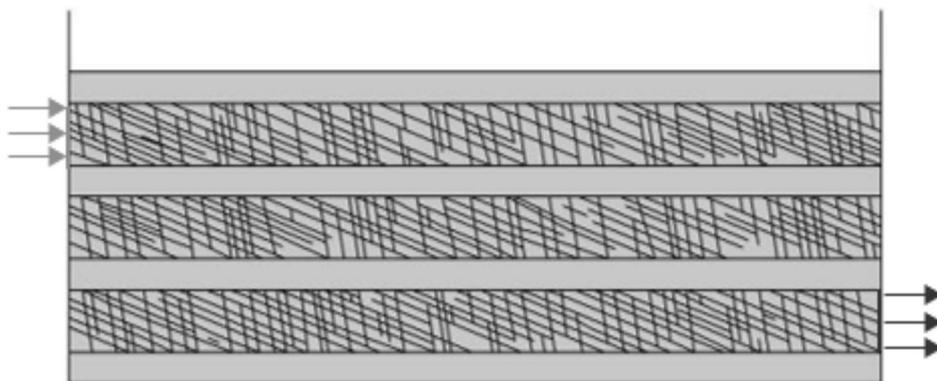


图2

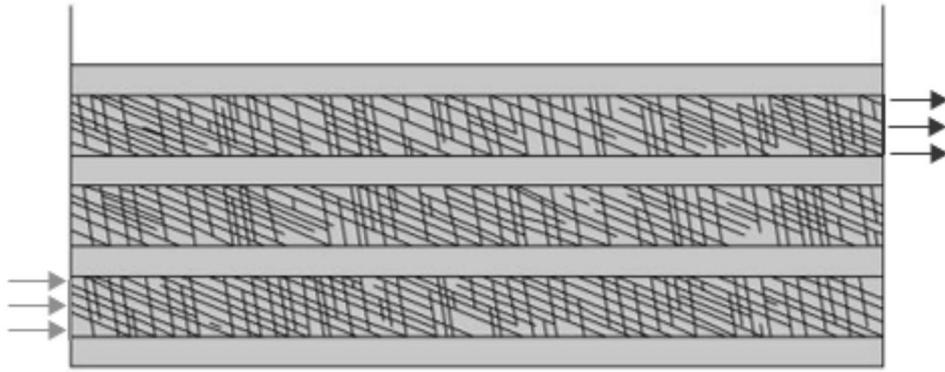


图3

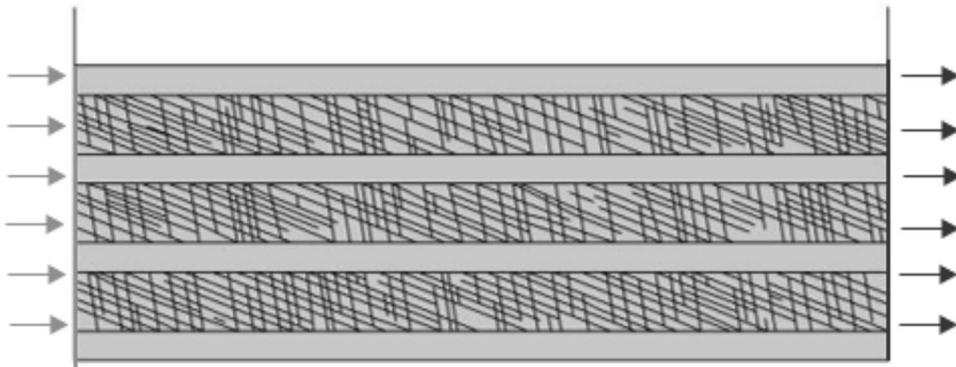


图4

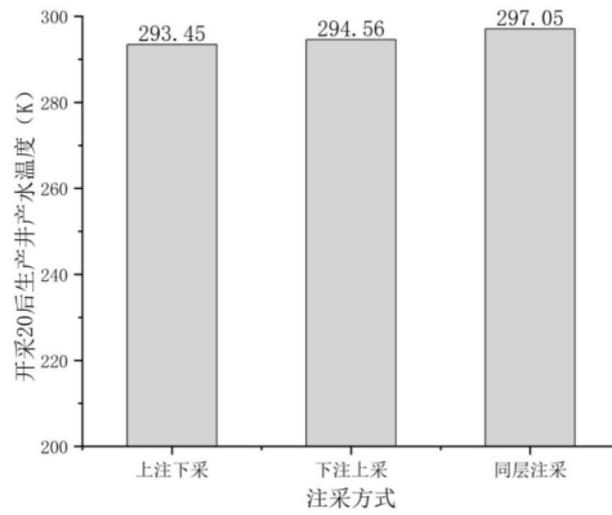


图5

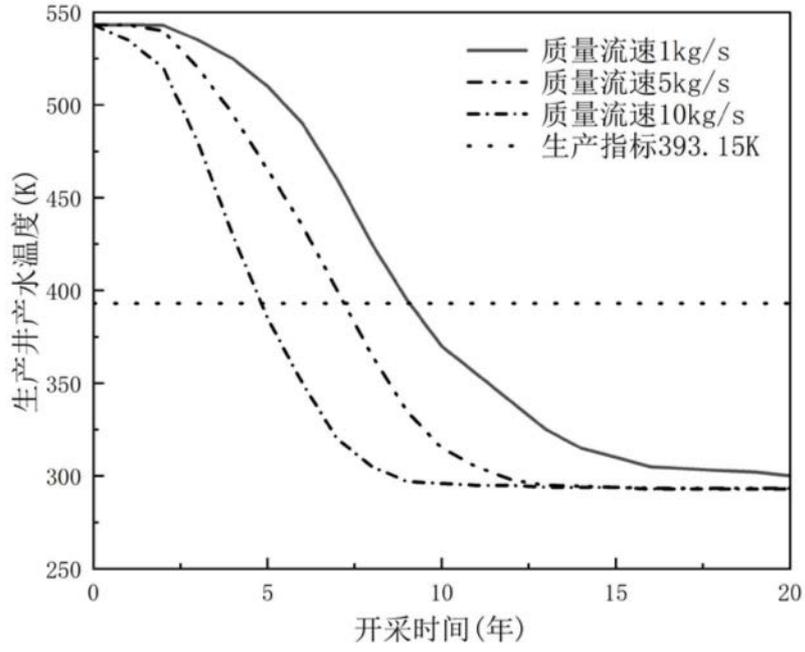


图6

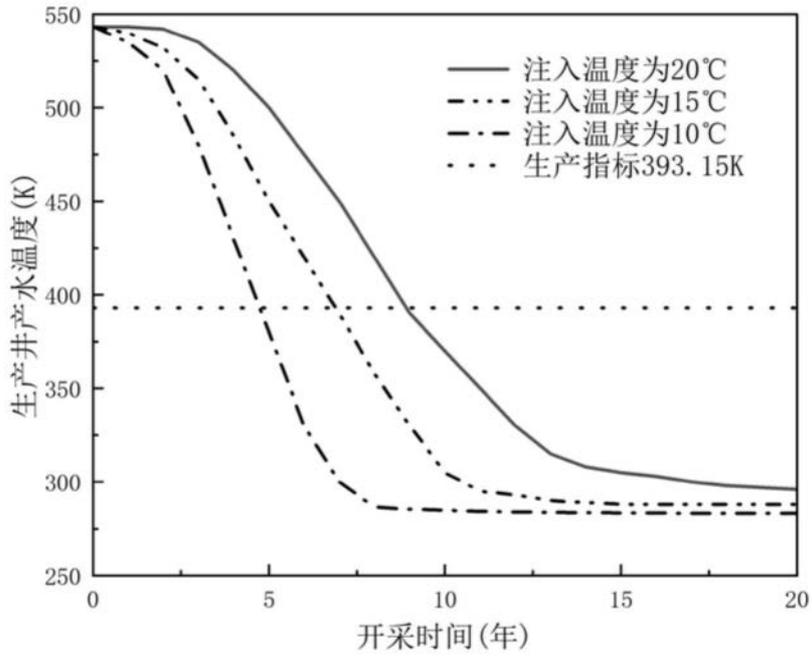


图7

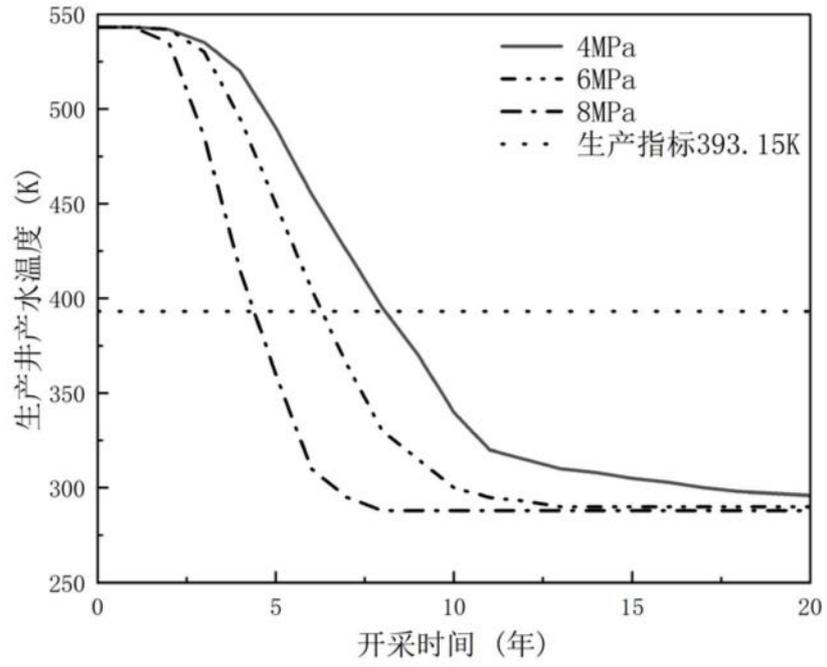


图8