

说明书

一种干热岩井壁失稳评价方法

技术领域

本申请涉及地热开发技术领域，尤其是涉及一种干热岩井壁失稳评价方法。

背景技术

随着社会经济持续发展和世界人口的增长，人类对于能源的需求不断增加。不过随着人类的开采，传统的化石能源比如石油、天然气、煤等日趋枯竭，预计到 2040 年，全球能源需求增长 112%。这迫使世界各国去寻找新型能源来满足人类需求。其中，地热能相较于风能、水能、太阳能等具有不受气候、季节、地域等的优点，且它是一种具有清洁、可再生、分布广的能源。据统计，世界地热能基础资源总量为 1.25×10^{27} 焦耳（折合 4.27×10^8 亿吨标准煤），其中埋深在 5000 米以浅的地热能基础资源量为 1.45×10^{26} 焦耳（折合 4.95×10^7 亿吨标准煤）。目前在地热能开发中把能够开发的高温岩体定义为干热岩。干热岩是一种埋藏深度为 3~10km，温度为 150~650℃ 的致密热岩体，其主要是各种变质岩或者结晶岩类岩体，花岗岩是典型的干热岩类型。据有关研究估计，地壳中可利用的干热岩资源量约是地球上所有煤炭、石油和天然气资源量的 30 倍，目前开采干热岩使用最多的方法是利用工程技术形成人工地热系统（EGS）。

尽管干热岩地热能具体诸多优点，但是开发与利用仍面临如下三大关键技术问题急需解决：高温高压下井壁稳定性控制技术、人工热储层的建造技术、地热稳定提取技术。高温高压下井壁稳定性控制是成功开发干热岩地热资源的第一步。井筒是开采干热岩的通道，低温钻井液与高温井壁直接接触，导致高温井壁岩石急速冷却，使井壁围岩遭受热冲击而发

生热破裂现象，其物理力学性质也会发生重大变化，导致井壁坍塌、掉块等失稳现象，一旦这些问题发生，就会导致干热岩开采成本增加，据统计由于井筒不稳定导致的计划外作业至少花费了平均井预算的 10%。因此了解干热岩井壁失稳机理、分析失稳原因，对于提高地热开采安全性、降低成本、钻井提速很有必要。

目前许多学者针对井壁失稳的研究较多，但干热岩埋藏深，处于高温高压环境下难以进行实验研究，因此对于干热岩井壁失稳的研究亟待研发。

发明内容

本申请的目的在于提供一种可以分析干热岩井壁失稳机理的干热岩井壁失稳评价方法。

本申请提供了一种干热岩井壁失稳评价方法，包括：

S1：建立所述目标干热岩井的井壁几何模型；

S2：获取目标干热岩井所在地层的岩石的矿物参数，根据所述矿物参数判断矿物类别；并根据所述矿物类别建立的岩石有限元模型，对所述岩石有限元模型进行判定、赋值；

S3：根据赋值后的所述岩石有限元模型和井壁几何模型，建立岩石非均质性的井壁几何模型；

S4：对所述岩石非均质性的井壁几何模型施加边界载荷，并根据损伤判据建立损伤模型；

S5：根据所述损伤模型进行所述目标干热岩井的井壁失稳模拟，得到不同工况下的井壁周围的破坏和应力分布，分析并判断不同工况下所述目标干热岩井的井壁失稳的机理。

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述矿物参数包括岩石的矿物成分、矿物的质量分数、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径大小；

所述矿物参数为含有坐标的矿物参数。

进一步地,在本申请的一些实施例中,所述岩石有限元模型基于 Voronoi 细分技术建立;

建立的岩石有限元模型,并利用所述矿物参数对所述岩石有限元模型
5 进行判定赋值,包括:

在 MATLAB 中进行 Voronoi 镶嵌形成 Voronoi 多边形,一个多边形包含了多个矿物颗粒,进行网格划分处理,确定每个网格点的矿物类别,再分别对该矿物类别的矿物进行材料属性赋值;

进行相邻所述矿物之间的胶结物判定,根据判定结果,对所述胶结物
10 进行材料属性赋值,得到赋值后的岩石有限元模型;

其中,所述矿物和胶结物的材料属性均包括杨氏模量、密度、孔隙率、比热容等。

进一步地,在本申请的一些实施例中,所述损伤判据为:

$$F_1 = \sigma_1 - \sigma_t$$
$$F_2 = -\sigma_3 + \sigma_1 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \sigma_c$$

15

式中, σ_t 为单轴抗拉强度; σ_c 为单轴抗压强度,分别表示岩石在受到单轴拉伸和压缩载荷下,受到最大的拉应力和最大压力;其值分别由巴西实验法和单轴压缩实验法获得; σ_1 、 σ_3 为第一主应力、第三主应力,MPa;

F_1 、 F_2 为拉伸和剪切破坏判据表达式,当 $F_1 \geq 0$ 或 $F_2 \geq 0$ 时,井周围岩
20 发生拉伸破坏或者剪切破坏;当 $F_1 \geq 0$ 、 $F_2 \geq 0$ 均不满足时,井周围岩不发生破坏。

进一步地,在本申请的一些实施例中,所述损伤判据还包括井周围岩破坏程度的判断,包括:

引入状态变量 D1、D2 来分别表示拉伸破坏和剪切破坏的井周围岩破
25 坏程度,且 D1、D2 的大小都为 0-1 之间,当 D1=D2=0 时,表示岩石未发

生拉伸和剪切破坏，当 $D1=D2=1$ 时，表示岩石发生完全破坏；

所述周围岩破坏程度中拉伸破坏程度为：

$$D1=1-\left|\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_1}\right|^m, F_1=0 \quad dF_1>0$$

所述周围岩破坏程度中剪切破坏程度为：

5

$$D2=1-\left|\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_3}\right|^m, F_2=0 \quad dF_2>0$$

式中， ε_t 为发生拉伸损伤时的最大拉伸应变； ε_c 为发生剪切损伤时发生的最大压应变； ε_1 为第一主应变； ε_3 为第三主应变； m 为一个发生损伤时的演化系数，无量纲，这里取 $m=2$ ； $dF_1>0$ 和 $dF_2>0$ 表示状态变量 $D1$ 、 $D2$ 是累积增加；其中 ε_t 、 ε_c 由巴西实验和单轴压缩实验得到的应力-应变曲线得出。

10

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述损伤判据的获得包括以下步骤：

基于岩石最大拉应力理论和莫尔-库伦理论，建立干热岩井壁围岩发生拉伸和剪切破坏公式；

15 根据岩石抗拉强度和抗压强度，结合岩石破坏强度理论，建立干热岩井壁围岩发生拉伸破坏和剪切破坏的判据，得到损伤判据。

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述干热岩井壁围岩发生拉伸和剪切破坏公式为：

当井周岩石发生拉伸破坏时，由最大拉应力理论，当井壁处第一主应力超过岩石的抗拉强度时，该处就会发生拉伸破坏，破坏条件为：

20

$$\sigma_1 = \sigma_t$$

式中， σ_1 为第一主应力，MPa； σ_t 为岩石抗拉强度，MPa；

当井周岩石发生剪切破坏时，根据莫尔-库伦理论，在岩石某一斜面上的剪应力大于或者等于内聚力和摩擦阻力之和时，岩石会沿着斜面发生剪

切滑移破坏，其表达式为：

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$$

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi$$

5 则用主应力表示为：

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中 τ_f 为剪切面上的剪切强度， σ 为剪切面上的正应力， φ 为内摩擦角， c 为内聚力， σ_1 、 σ_3 为第一主应力、第三主应力；其中， φ 、 c 由岩石单轴压缩实验测得。

10 进一步地，在本申请的一些实施例中，所述井壁几何模型为考虑最大拉应力准则和莫尔库伦准则而建立的二维有限元模型。

进一步地，在本申请的一些实施例中，所述损伤模型采用 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件建立。

15 进一步地，在本申请的一些实施例中，采用 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件建立所述损伤模型，包括：

在 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件中进行柱坐标下应力转换，转换表达式为：

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$$

20

$$\sigma_{zz} = \sigma_z$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta$$

$$\begin{aligned}
\sigma_i &= \sigma_{rr} \\
\sigma_j &= \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \\
\sigma_k &= \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2} \\
\sigma_1 &= \max(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k) \\
\sigma_3 &= \min(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k)
\end{aligned}$$

将所有的应力参数替换为对应的应变，得到柱坐标下的应变表达式：

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta + \gamma_{xy}\sin 2\theta \\
\varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta - \gamma_{xy}\sin 2\theta \\
\varepsilon_{zz} &= \varepsilon_z \\
\gamma_{\theta z} &= \gamma_{yz}\cos\theta - \gamma_{xz}\sin\theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_i &= \varepsilon_{rr} \\
\varepsilon_j &= \frac{\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \\
\varepsilon_k &= \frac{\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2} \\
\varepsilon_1 &= \max(\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k) \\
\varepsilon_3 &= \min(\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k)
\end{aligned}$$

式中， σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} 为直角坐标系下任意一点的应力分量； $\tau_{\theta z}$ 为剪应力； ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{xz} 为直角坐标系下任意一点的形变分量； $\gamma_{\theta z}$ 为剪应变； σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 、 ε_{rr} 、 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 、 ε_{zz} 分别为径向应力、切向应力、轴向应力、径向应变、切向应变、轴向应变； σ_i 、 σ_j 、 σ_k 为柱坐标系下三个主应力； ε_i 、 ε_j 、 ε_k 为柱坐标系下三个主应变。

本申请提供一种干热岩井壁失稳评价方法，采用离散元软件和有限元软最终建立包括不同矿物和胶结物的岩石有限元模型，并结合岩石损伤理论建立了井壁损伤模型，对井壁失稳形式（拉伸和剪切破坏）可以更加直

5 观的观察，能够较好的贴合实际分析干热岩井壁失稳机理。其岩石有限元模型基于矿物组成成分、矿物质量分数、矿物密度和矿物粒径大小等矿物参数建立，并考虑了矿物颗粒之间的胶结物，能够较好的贴合岩石的实际情况，提高分析结果的准确性，为实际钻井工程中井壁失稳控制、干热岩钻井参数设定、更深部干热岩开发提供一定的理论参考。

该方法采用数值模拟的方法，能够打破实验中不能实现极高压、极高温条件下研究干热岩井壁失稳机理的局限性，在一定程度上提高了安全性，并能够节省大量人力和资金。

附图说明

- 10 图 1 为本申请提供的实施例中的井壁几何模型网格划分；
图 1A 为本申请提供的图 1 中的局部放大图；
图 2 为本申请提供的实施例中基于 Voronoi 细分的花岗岩有限元模型的建立过程；
图 3 为本申请提供的实施例中井壁围岩损伤模型建立过程；
15 图 4 为本申请提供的实施例中非均质性对井壁失稳的影响；
图 5 为本申请提供的实施例中不同泥浆压力对井壁失稳的影响；
图 6 为本申请提供的实施例中温差诱导产生热破裂对井壁失稳影响；
图 7 为本申请提供的实施例中在 100min 时刻温差为 260℃ 的应力分布；
20 图 8 为本申请提供的一种干热岩井壁失稳评价方法的流程示意图；
图 9 为本申请提供的损伤模型中应力-应变关系图。

具体实施方式

下面将结合实施例对本申请方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中

的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

第一方面，本申请提供了一种干热岩井壁失稳评价方法，包括：

S1：建立所述目标干热岩井的井壁几何模型；

5 S2：获取目标干热岩井所在地层的岩石的矿物参数，根据所述矿物参数判断矿物类别；并根据所述矿物类别建立的岩石有限元模型，对所述岩石有限元模型进行判定、赋值；

S3：根据赋值后的所述岩石有限元模型和井壁几何模型，建立岩石非均质性的井壁几何模型；

10 S4：对所述岩石非均质性的井壁几何模型施加边界载荷，并根据损伤判据建立损伤模型；

S5：根据所述损伤模型进行所述目标干热岩井的井壁失稳模拟，得到不同工况下的井壁周围的破坏和应力分布，分析并判断不同工况下所述目标干热岩井的井壁失稳的机理。

15 在步骤 S1 中，所述井壁几何模型为考虑最大拉应力准则和莫尔库伦准则而建立的二维有限元模型。

为减小应力边界效应，模型尺寸大于井眼直径数倍，如三倍即可。是理性的，当井眼直径为 216mm 时，模型尺寸可以为 1000mm×1000mm。

20 所述井壁几何模型可以为完整的井壁模型，也可以优选为 1/2 井壁模型。进一步优选的，为了简化模型和便于运算，考虑到此问题为一个平面轴对称问题，因此所述井壁几何模型可以只建立 1/4 井壁力学模型。

在建立井壁几何模型时，为了增加模拟结果的有效性和减少处理数据、提高处理效率，可以对井壁周围一定区域，这里对内环半径为 108mm、外环半径为 150mm 的圆环内的区域进行网格细分，而其余区域网格粗化。

在步骤 S2 中，目标干热岩井所在地层的岩石的矿物参数根据 XRD 衍射实验和 CT 扫描实验得到，其矿物参数包括岩石的矿物成分、矿物的质量分数、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径大小。

此外，本申请中的矿物参数为含有坐标的矿物参数，其矿物颗粒通过 PFC2D 软件（ITASCA 公司）生成，其矿物颗粒的坐标也通过 PFC2D 软件得到。

在岩石有限元模型建立的过程中，包括以下步骤：

基于上述含有坐标的矿物颗粒，在 MATLAB（MathWorks 公司）中进行 Voronoi 镶嵌形成 Voronoi 多边形，一个多边形包含了多个矿物颗粒，然后进行网格划分处理，确定每个网格点的矿物类别，再分别赋予材料属性。因在热-力耦合作用下，岩石发生损伤是矿物颗粒间胶结物和矿物颗粒间发生错位和微破裂的过程（受力损伤和热破裂的复合损伤），所以有必要对矿物间的胶结物进行判定并赋值。对于每个相邻矿物的胶结物，需要判定是否都不属于矿物材料，判定方法是：在 MATLAB 中赋予矿物材料属性后，判断一个网格点的上下左右网格点的材料属性是否相同，若相同则跳过，反之则判定为胶结物并赋予材料属性，使其每一个矿物及胶结物都会表现出相应特性。

其中，所述矿物和胶结物的材料属性均包括杨氏模量、密度、孔隙率、比热容等。

将赋值后的所述岩石有限元模型结合在井壁几何模型中，即可建立岩石非均质性的井壁几何模型。

在步骤 S4 中，边界载荷包括围压、泥浆压力及设定岩石温度和泥浆温度。其所述损伤判据为：

$$F_1 = \sigma_1 - \sigma_t$$

$$F_2 = -\sigma_3 + \sigma_1 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \sigma_c$$

式中， σ_t 为单轴抗拉强度； σ_c 为单轴抗压强度，分别表示岩石在受到单轴拉伸和压缩载荷下，受到最大的拉应力和最大压力；其值分别由巴西实验法和单轴压缩实验法获得； σ_1 、 σ_3 为第一主应力、第三主应力，MPa；

5 F_1 、 F_2 为拉伸和剪切破坏判据表达式，当 $F_1 \geq 0$ 或 $F_2 \geq 0$ 时，井周围岩发生拉伸破坏或者剪切破坏；当 $F_1 \geq 0$ 、 $F_2 \geq 0$ 均不满足时，井周围岩不发生破坏。

所述损伤判据还包括井周围岩破坏程度的判断，包括：

为了表征井周围岩在受到损伤时情况，引入状态变量 D1、D2 来分别表示拉伸破坏和剪切破坏的井周围岩破坏程度，且 D1、D2 的大小都为 0-1
10 之间，当 D1=D2=0 时，表示岩石未发生拉伸和剪切破坏，当 D1=D2=1 时，表示岩石发生完全破坏（也可认为此时产生裂纹）；

所述周围岩破坏程度中拉伸破坏程度为：

$$D1 = 1 - \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_1} \right|^m, F_1 = 0 \quad dF_1 > 0$$

所述周围岩破坏程度中剪切破坏程度为：

15
$$D2 = 1 - \left| \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_3} \right|^m, F_2 = 0 \quad dF_2 > 0$$

式中， ε_t 为发生拉伸损伤时的最大拉伸应变； ε_c 为发生剪切损伤时发生的最大压应变； ε_1 为第一主应变； ε_3 为第三主应变； m 为一个发生损伤时的演化系数，无量纲，这里取 $m=2$ ； $dF_1 > 0$ 和 $dF_2 > 0$ 表示状态变量 D1、D2 是累积增加；其中 ε_t 、 ε_c 由巴西实验和单轴压缩实验得到的应力-应变曲线得
20 出。 ε_t 、 ε_c 在应力-应变曲线中与 σ_t 、 σ_c 的取值关系如图 9 所示。

所述损伤判据的获得包括以下步骤：

基于岩石最大拉应力理论和莫尔-库伦理论，建立干热岩井壁围岩发生拉伸和剪切破坏公式；

根据岩石抗拉强度和抗压强度，结合岩石破坏强度理论，建立干热岩

井壁围岩发生拉伸破坏和剪切破坏的判据，得到损伤判据。

由于井壁发生失稳时主要为发生拉伸破坏和剪切破坏，因此当井周岩石发生拉伸破坏时，由最大拉应力理论，当井壁处第一主应力超过岩石的抗拉强度时，该处就会发生拉伸破坏，破坏条件为：

5
$$\sigma_1 = \sigma_t$$

式中， σ_1 为第一主应力，MPa； σ_t 为岩石抗拉强度，MPa；

当井周岩石发生剪切破坏时，莫尔-库伦理论(Mohr-Coulomb 强度准则)认为材料的破坏主要是剪切破坏，在某一斜面上的剪应力大于或者等于内聚力和摩擦阻力之和时，就会沿着斜面发生剪切滑移破坏，因此莫尔-库伦
10 理论表达式为：

$$\begin{aligned}\tau_f &= \sigma \tan \varphi + c \\ \tau_f &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi \\ \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi\end{aligned}$$

则用主应力表示为：

15
$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

式中 τ_f 为剪切面上的剪切强度， σ 为剪切面上的正应力， φ 为内摩擦角， c 为内聚力， σ_1 、 σ_3 为第一主应力、第三主应力；其中， φ 、 c 由岩石单轴压缩实验测得。

所述损伤模型采用 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件（COMSOL 公
20 司）建立，其具体包括以下步骤：

用 MATLAB 导出的 Voronoi 多边形中每个附含矿物及胶结物参数特性的坐标点，形成插值函数的形式导入 COMSOL Multiphysics 多场耦合软件中，建立干热岩井壁损伤模型。在此过程中，由于在分析井周岩石所受应力时，选用柱坐标表示较直角坐标更加方便，因此在 COMSOL Multiphysics

多场耦合软件中进行坐标转换，利用坐标 r 、 θ 、 z 来确定模型任意一点的应力，其转换表达式为：

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{yz}\cos\theta - \tau_{xz}\sin\theta$$

$$\sigma_i = \sigma_{rr}$$

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2}$$

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta z}^2}$$

$$\sigma_1 = \max(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k)$$

$$\sigma_3 = \min(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k)$$

将所有的应力参数替换为对应的应变，得到柱坐标下的应变表达式：

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta + \gamma_{xy}\sin 2\theta$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos 2\theta - \gamma_{xy}\sin 2\theta$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_z$$

$$\gamma_{\theta z} = \gamma_{yz}\cos\theta - \gamma_{xz}\sin\theta$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{rr}$$

$$\varepsilon_j = \frac{\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2}$$

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{2}\right)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \max(\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k)$$

$$\varepsilon_3 = \min(\varepsilon_i, \varepsilon_j, \varepsilon_k)$$

式中， σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} 为直角坐标系下任意一点的应力分量； $\tau_{\theta z}$ 为剪应力； ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{xz} 为直角坐标系下任意一点的形变分量；

$\gamma_{\theta z}$ 为剪应变； σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 、 ε_{rr} 、 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 、 ε_{zz} 分别为径向应力、切向应力、轴向应力、径向应变、切向应变、轴向应变； σ_i 、 σ_j 、 σ_k 为柱坐标系下三个主应力； ε_i 、 ε_j 、 ε_k 为柱坐标系下三个主应变。

在 S5 中，根据所述损伤模型进行所述目标干热岩井的井壁失稳模拟，得到不同工况下的井壁周围的破坏和应力分布，其中所述不同工况包括非均质性、不同泥浆压力、岩石温度，然后对比不同工况下井壁周围所产生的破坏和应力分布，分析在不同工况下干热岩井壁失稳机理，得到干热岩井壁的失稳原因。

为了更好的说明本申请所提供的一种干热岩井壁失稳评价方法，便于本领域的技术人员理解该方法的技术效果，下面通过一个例子来具体说明。

该目标干热岩井为埋深 3~10km、温度高于 180℃ 的高温岩体，在开采过程中需要钻出注入井（将低温水注入）和生产井（产出高温汽、水用于发电）。这里模型井眼直径为 216mm，为减小应力边界效应，模型尺寸大于井眼直径三倍，并考虑热弹塑性，建立模型尺寸为 1000mm*1000mm 的二维有限元模型的井壁几何模型。为了简化模型和便于运算，考虑到此问题为一个平面轴对称问题，因此只建立 1/4 井壁力学模型，细化区域大小为半径 150mm。图 1 和图 1A 展示了井壁几何模型网格划分。

根据 XRD 衍射实验和 CT 扫描实验确定的钻进地层中岩石的矿物成分、矿物的质量分数、不同矿物的密度以及矿物颗粒的粒径大小，然后用 PFC2D 软件生成的尺寸为 500mm×500mm 的矿物颗粒并得到其中心坐标，在 MATLAB 中进行 Voronoi 镶嵌形成 Voronoi 多边形，一个多边形包含了多个矿物颗粒，然后进行网格划分处理，确定每个网格点的矿物类别，再分别赋予材料属性，接下来在 MATLAB 中进行胶结物判定并赋予参数。该干热岩井的矿物参数和材料属性如表 1 所示。

表 1

矿物/材料特性	比热容 (J/(kg·K))	热膨胀系数 (1/K)	导热系数 (W/(m·K))	孔隙率 (1)	弹性模量 (Pa)	泊松比 (1)	密度 (kg/m ³)
斜长石	711	7.5e-6	2.34	0.009	53e9	0.13	2630
石英	750	16e-6	4.94	0.009	75e9	0.08	2630
钠长石	712	10.67e-6	3.26	0.016	55e9	0.12	2540
云母	760	12.1e-6	3.14	0.009	32e9	0.16	2800
胶结物	870	5e-6	5	0.05	10e9	0.168	2200

图 2 展示了基于 Voronoi 细分的花岗岩有限元模型的建立过程。

用 MATLAB 软件导出 Voronoi 多边形中每个附含矿物和胶结物参数特性的坐标点，形成插值函数的形式导入 COMSOL Multiphysics 软件，与井壁几何模型结合，通过施加钻井过程中井筒受到的地应力（最大水平应力和最小水平应力）和泥浆压力以及因干热岩所处的高温环境设置岩石温度，再引入损伤判据和应力计算公式建立干热岩井壁损伤模型，实现热-力耦合数值模拟分析。其具体的边界载荷如表 2 所示。

表 2

图表 \ 应力	最大水平应力 (MPa)	最小水平应力 (MPa)	泥浆压力 (MPa)
图 4	100	20	10
图 5	100	70	0~140
图 6	100	70	60

图 3 展示了井壁围岩损伤模型建立过程。

然后基于损伤模型，对干热岩井壁失稳进行数值模拟，得到不同工况下的井壁周围破坏和应力分布；图 4 展示了非均质性对井壁失稳的影响。从图 4 可以清楚的发现非均质性对近井筒应力会产生显著的干扰，导致应

力产生波动，这是非均质的特性，与实际情况更加接近；图 5 展示了不同泥浆压力对井壁失稳的影响，通过对井周应力的分析，可以发现井壁破坏方式与不同应力有着明显的关系，而泥浆压力会显著改变井周应力，合适的泥浆压力可以显著提高井壁稳定性；图 6 展示了温差诱导产生热破裂对井壁失稳影，图 7 展示了温差在 260℃时，时间在 100min 的应力分布，可以发现温差诱导产生的热破裂主要是剪切破裂，并且与无温度时剪切破坏方向不同，主要是因为温差导致轴向应力变为第一主应力，且轴向应力集中在矿物颗粒中，导致了剪切破坏发生在矿物颗粒中。最后，对比不同工况下井壁周围所产生的破坏以及应力分布，分析干热岩井壁失稳的机理。

以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以对本发明进行若干改进和修饰，这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或对其部分或全部技术特征进行等同替换；而这些修改或替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的范围。