



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118376118 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 20

(21) 申请号 202410822062.4

(22) 申请日 2024.06.25

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 118376118 A

(43) 申请公布日 2024.07.23

(73) 专利权人 中国矿业大学  
地址 221000 江苏省徐州市大学路1号  
专利权人 深地科学与工程云龙湖实验室  
中国地质环境监测院  
浙江宝树建设有限公司

(72) 发明人 褚召祥 田家丰 谢海滨 谢传希  
郝富瑞 刘乾玺 李晓昭 高蓬辉  
刘展

(74) 专利代理机构 北京淮海知识产权代理事务所(普通合伙) 32205

专利代理师 薛茹丹

(51) Int.Cl.  
F28D 20/00 (2006.01)  
G06F 30/28 (2020.01)  
G01D 21/02 (2006.01)  
E21F 17/16 (2006.01)  
G06F 113/08 (2020.01)  
G06F 119/14 (2020.01)  
G06F 119/08 (2020.01)

(56) 对比文件  
CN 110410148 A, 2019.11.05  
CN 113626991 A, 2021.11.09

审查员 郭晓明

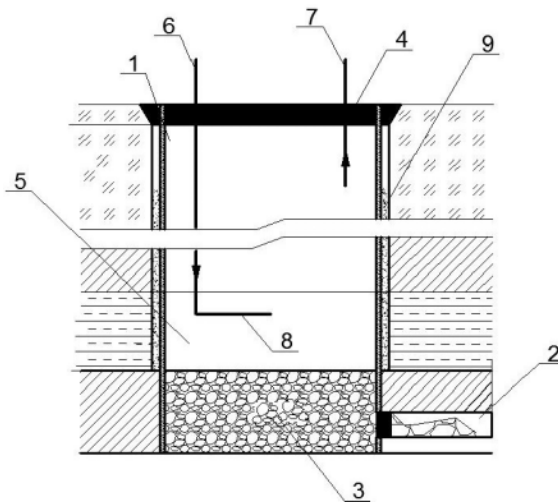
权利要求书3页 说明书11页 附图8页

(54) 发明名称

一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置及方法

(57) 摘要

一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置及方法,装置:在废弃煤矿井筒底部、底部与水平巷道连通处设封填段,顶部设有密封段,封填段与密封段之间的井筒为储水储热段;在密封段上沿其井筒轴向开设有两个分别用于埋设进水管和出水管的通孔,进水管下端伸入至储水储热段靠近底部位置处,出水管下端伸入至储水储热段靠近顶部位置处。方法:通过对废弃煤矿井筒生产-闭坑参数调查、对废弃煤矿井筒钻孔启封与探测窥视、基于废弃煤矿井筒抽水试验的水文地质参数计算、封闭加固注浆、井壁重构再造及容积确定、3D水文地质和抽灌方案储热效果模拟。该装置及方法实现了废弃煤矿井筒向绿色储热系统的转型以及跨季节蓄水储热并向矿区周边建筑供暖。



1. 一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置,包括废弃煤矿井筒(1),其特征在于,所述废弃煤矿井筒(1)底部与水平巷道(2)连通处设有封填段(3),顶部设有密封段(4),封填段(3)与密封段(4)之间的井筒(1)为储水储热段(5);在所述密封段(4)上沿其径向开设有两个分别用于埋设进水管(6)和出水管(7)的通孔,所述进水管(6)下端伸入至储水储热段(5)靠近底部位置处,出水管(7)下端伸入至储水储热段(5)靠近顶部位置处;进水管(6)上端和出水管(7)上端伸出密封段(4)顶部;所述的进水管(6)和出水管(7)关于废弃煤矿井筒(1)中心轴对称,且进水管(6)和出水管(7)距离废弃煤矿井筒(1)中心轴的距离均为 $\sqrt{2}/4D$ , $D$ 为井筒(1)内径;进水管(6)伸入至储水储热段(5)距离封填段(3)顶部 $H/4$ 位置处, $H$ 为储水储热段(5)的高度;出水管(7)伸入至储水储热段(5)距离封闭段底部 $H/4$ 位置处;所述的进水管(6)下端连通有延伸至井筒(1)中心轴所在处的水平管路(8)。

2. 根据权利要求1所述的基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置,其特征在于,所述的储水储热段(5)的井筒(1)通过壁后注浆进行加固并在注浆液(9)内添加低导热系数纳米材料;所述密封段(4)为密封井盖,其直径至少比井筒(1)直径大2m,其厚度大于1m。

3. 一种利用权利要求1至2任一项所述的基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置的储热方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤一、开展废弃煤矿井筒(1)的生产、闭坑参数调查,包括矿井主要生产技术资料图、矿井的位置坐标、矿井的类型、矿井井管材质、矿井井径、矿井井深、矿井结构图、井筒地层剖面图、井筒地层水文地质资料、闭坑封井施工设计及竣工报告;

步骤二、对废弃煤矿井筒(1)的完整性进行评估,包括井筒密封段(4)中心钻孔启封、井壁混凝土取样、井筒矿井水取样、井筒矿井水水位监测、井壁完整性和井巷连通性水下窥视、井筒密封段(4)中心钻孔再密封;根据现场条件开展井筒矿井水温盐深剖面监测,完成废弃煤矿井筒(1)完整性及可利用性评估分析报告;

步骤三、对于步骤二确定的可利用的废弃煤矿井筒(1),通过井筒密封段(4)中心钻孔安设矿用潜水泵,开展大直径井筒(1)内钻孔单孔、大流量稳定流抽水试验,获得流量-时间、水位降深-时间曲线,通过以下标准公式迭代计算废弃煤矿井筒(1)抽采影响半径 $R$ 、渗透系数 $K$ 的井筒地层水文地质参数:

$$\begin{cases} R = 10S\sqrt{K} \\ K = \frac{0.336q}{SM} \ln \frac{R}{r} \end{cases}$$

式中, $q$ 为抽水流量,单位 $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $S$ 为降深,单位 $\text{m}$ ;  $r$ 为井筒半径,单位 $\text{m}$ ;  $M$ 为井深,单位 $\text{m}$ ;

步骤四、根据井筒(1)抽水试验结果,若获得的 $K \leq K'$ ,其中, $K'$ 为生产时期井筒(1)地层渗透系数,则认定为废弃煤矿井筒(1)矿井水储热存在类水封效应,忽略矿井水通过井筒(1)井壁的渗流对储热性能的影响;

若获得的 $K > K'$ ,则认定为废弃煤矿井筒井壁发生破裂、井筒变形,井筒矿井水及周围地层地下水的渗流运移明显,影响井筒矿井水储热效果;结合废弃煤矿井筒井壁完整性探测窥视结果,对井壁破损点采取水下喷射混凝土、壁后注浆封闭加固井壁措施;继续开展措施效果检验,实施二次抽水试验,若仍然存在 $K > K'$ ,则继续开展废弃煤矿井筒(1)井壁的重构再造,分节预制完整井壁并通过沉井法再造形成比原废弃井筒小但同轴的内井壁,保持再造内井壁与原井壁厚度相同,内井壁所形成新的储水储热段(5)用于矿井水储热;根据重构

改造后的井筒参数、地面供热负荷和储热期热损失确定井筒矿井水储热容积；

以井筒(1)内矿井水体和井筒周围地层作为联合储热体,采用如下方法确定井筒(1)矿井水储热容积:假定冬季采暖建筑供热面积所需的热负荷 $Q_{load}$ ,由工业余废热如太阳能集热量 $Q_c$ 和井筒矿井水储热系统的储热量 $Q_s$ 克服储热损失 $Q_{loss}$ 提供,则有: $Q_{load} = Q_c - Q_{loss} + Q_s$ ;

在太阳能跨季节地下储热系统的初期阶段,太阳能集热器向矿井井筒(1)内水体输送热量,使水温逐渐上升;这些热量从水体中传递到井筒(1)周围地层,使得接触水体的岩土温度上升;较暖的岩土将热量进一步传播到更广泛的区域;

当进入供暖季节时,由于持续的热量抽取,井筒(1)内矿井水体的温度逐步下降;此时太阳能集热器向围岩地层传递的热量远大于从围岩地层中回收的热量,即 $Q_{loss} > 0$ ;

随着系统的长期运行,形成井筒(1)水体及地层围岩储热层;在供暖季节,如果井筒(1)水体温度因取热而下降,这时围岩地层将其储存的热量释放给井筒(1)水体,使井筒(1)水体温度逐渐回升,围岩地层发挥储热作用,即热量流出围岩, $Q_{loss} < 0$ ,故存在 $Q_{loss}$ 趋于零的过渡时期,这时井筒(1)水体接收的热量与围岩地层释放的热量达到动态平衡;如果此时停止热量的注入,系统将维持这种平衡状态,则有: $\rho c_p \dot{V}(T - T_0) + Q_{wc} = Q_{load}$ ;

式中, $\rho$ 为矿井水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为恒压比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为井筒(1)水体温度;  $T_0$ 为冬季室内要求温度;  $Q_{wc}$ 为冬季该时刻集热量;  $\dot{V}$ 为该时刻取水流量,单位 $\text{m}^3/\text{h}$ ;

井筒矿井水储热容积 $V$ 根据取水流量和规定的该时刻的换水次数 $n$ 确定: $V = \dot{V}/n$ ;

步骤五、根据所选择的废弃煤矿井筒(1),建立井筒(1)及周围地层几何模型和数值计算模型控制方程,设置不同工况参数及组合,包括井筒(1)矿井水储热容积、进水管(6)和出水管(7)位置、初始及目标温度、废弃煤矿井筒(1)及地层渗透系数等边界和初始条件参数;采用数值模拟软件开展基于3D水文地质模型的井筒(1)矿井水储热方案数值仿真实验,分析矿井水储热温度衰减变化规律、确定最优渗透系数、储热作用半径、储热用热循环周期特征及参数组合方案,综合分析废弃煤矿井筒(1)矿井水储热可利用性;

其中,井筒(1)内流体在加热和蓄热过程中,传热过程遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,基本控制方程表达如下:

质量守恒方程在流体力学中表述为连续性方程,即流体微元体在单位时间内质量的增加,等于同样间隔时间内流入该微元体的净质量,其微分表达式如下式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0;$$

式中, $u, v, w$ 分别代表流体微团在 $x, y, z$ 三个方向上的速度分量,单位 $\text{m}/\text{s}$ ;

动量守恒即微元体中流体的动量随时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种外力之和,对于粘性不可压缩流动,又称纳维-斯托克斯方程,其在 $x, y, z$ 三个方向上的动量方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y; \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases}$$

式中,  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的速度分量, 单位  $m/s$ ;  $\tau$  是微元体表面的切向应力, 单位  $pa$ ;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的质量力, 单位  $m/s^2$ ;

能量守恒方程:  $\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}T) = \nabla \cdot (a\nabla T) + S_T + Q_V$ ; 式中,  $a$  为热扩散率, 单位  $m^2/s$ ,  $a = \lambda/\rho c_p$ , 其中,  $\lambda$  为流体的传热系数, 单位  $w/(m \cdot K)$ ;  $S_T$  为黏性耗散项;  $Q_V$  为体积热源;

对于井筒(1)围岩, 在初步研究中仅看作固体, 不考虑多孔介质的渗流流动换热对蓄热的影响, 此时围岩的能量守恒方程为非稳态导热微分方程, 即:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

4. 根据权利要求3所述的基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热方法, 其特征在于, 所述步骤五中, 进水管(6)和出水管(7)位置的确定采用等圆环面法确定, 过程如下:

对内径为  $D$  的井筒(1), 进水管(6)和出水管(7)在同一井筒(1)圆形横断面直径线上, 进水管(6)和出水管(7)分别居于井筒(1)中心两侧, 其布管位置采用下式计算:

$$r_{2i-1} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{2i-1}{2N}}; \text{ 式中, } i \text{ 为等圆环面的序号, 从井筒(1)横断面圆的圆心开始, } i=1, 2, 3 \dots$$

$\dots$ ;  $N$  为圆环面的等分数或个数,  $N=1, 2, 3 \dots$ , 同一储水井筒(1)高度下每个圆环下储存的矿井水体积相等。

5. 根据权利要求3所述的基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热方法, 其特征在于, 所述步骤五中, 3D数值模拟几何模型的选择分为包含井筒和全矿井范围的非规则异形几何结构模型以及包含井筒和附近地层的圆柱体/立方体/长方体规则几何结构模型两类。

## 一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置及方法,属于地下空间储能和可再生能源协同开发与利用技术领域。

### 背景技术

[0002] 煤矿等井工开采矿山废弃后会遗留下大量地下井巷空间,该废弃空间在排水停止后即被地下矿井水“回弹”淹没,可以开展以矿井水为工作介质的低品位热能存储。地下热能储存作为一种独特的储热方法,利用地表下不同地质结构作为“容器”,并使用水或压缩空气等作为储能介质,具有低储存成本、长储存周期、大储存容量及不占用地面空间等优点。目前,地下水显热储存主要有以下几种类型:钻孔储热、地下水箱储热、含水层储热和废弃矿井储热。煤矿闭坑后,采场垮落、巷道坍塌,而井筒作为混凝土砌筑结构其支护强度高、服役寿命长,纵向空间大,更适合开展大体积矿井水地下储热。

[0003] 废弃煤矿井筒经过矿产资源开发周期的服役,容易出现井壁开裂、透水、腐蚀、碳化等劣化现象,目前对于废弃井筒的研究还难以有效解决矿井水储热时的水渗漏、热损失等问题。

### 发明内容

[0004] 本发明提供一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置及方法,该装置及方法能够实现废弃煤矿井筒向绿色储热系统转型,实现跨季节蓄水储热并向矿区周边建筑供暖。

[0005] 为了实现上述目的,本发明提供了一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置,包括废弃煤矿井筒,所述废弃煤矿井筒底部与水平巷道连通处设有封填段,顶部设有密封段,封填段与密封段之间的井筒为储水储热段;在所述密封段上沿其径向开设有两个分别用于埋设进水管和出水管的通孔,所述进水管下端伸入至储水储热段靠近底部位置处,出水管下端伸入至储水储热段靠近顶部位置处;进水管上端和出水管上端伸出密封段顶部。

[0006] 进一步地,所述的进水管和出水管关于废弃煤矿井筒中心轴对称,且进水管和出水管距离废弃煤矿井筒中心轴的距离均为 $\sqrt{2}/4D$ ,  $D$ 为井筒内径;进水管伸入至储水储热段距离封填段顶部 $H/4$ 位置处, $H$ 为储水储热段的高度;出水管伸入至储水储热段距离封闭段底部 $H/4$ 位置处。

[0007] 进一步地,所述的进水管下端连通有延伸至井筒中心轴所在处的水平管路。

[0008] 进一步地,所述的储水储热段的井筒通过壁后注浆进行加固并在注浆液内添加低导热系数纳米材料;所述密封段为密封井盖,其直径至少比井筒直径大2m,其厚度大于1m。

[0009] 一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热方法,包括如下步骤:

[0010] 步骤一、开展废弃煤矿井筒的生产、闭坑参数调查,包括矿井主要生产技术资料图、矿井的位置坐标、矿井的类型、矿井井管材质、矿井井径、矿井井深、矿井结构图、井筒地

层剖面图、井筒地层水文地质资料、闭坑封井施工设计及竣工报告；其中，矿井主要生产技术资料图包括井上井下对照图、采掘工程平面图和工业场地平面布置图；

[0011] 步骤二、对废弃煤矿井筒的完整性进行评估，包括井筒密封段中心钻孔启封、井壁混凝土取样、井筒矿井水取样、井筒矿井水水位监测、井壁完整性和井巷连通性探测、井筒密封段中心钻孔再密封，其中，井壁完整性和井巷连通性均通过水下摄像头窥视；根据现场条件开展井筒矿井水温盐深剖面监测，完成废弃煤矿井筒完整性及可利用性评估分析报告；

[0012] 步骤三、对于步骤二确定的废弃煤矿井筒，通过密封段中心钻孔安设矿用潜水泵，通过开展大直径井筒内钻孔单孔、大流量稳定流抽水试验，获得流量-时间、水位降深-时间曲线，通过以下标准公式迭代计算废弃煤矿矿井水井筒抽采影响半径 $R$ 、渗透系数 $K$ 等井筒

$$\text{地层水文地质参数: } \begin{cases} R = 10S\sqrt{K} \\ K = \frac{0.336q}{SM} \ln \frac{R}{r} \end{cases};$$

[0013] 式中， $q$ 为抽水流量，单位 $\text{m}^3/\text{s}$ ； $S$ 为降深，单位 $\text{m}$ ； $r$ 为井筒半径，单位 $\text{m}$ ； $M$ 为井深，单位 $\text{m}$ ；

[0014] 步骤四、根据井筒抽水试验结果，若获得的 $K \leq K'$ ，其中， $K'$ 为生产时期井筒地层渗透系数，则认定为废弃煤矿井筒矿井水储热存在类水封效应，忽略矿井水通过井筒井壁的渗流对储热性能的影响；

[0015] 若获得的 $K > K'$ ，则认定为废弃煤矿井筒井壁发生破裂、井筒变形，井筒矿井水及周围地层地下水的渗流运移明显，影响井筒矿井水储热效果；结合废弃煤矿井筒井壁完整性探测窥视结果，对井壁破损点采取水下喷射混凝土、壁后注浆封闭加固井壁措施；继续开展措施效果检验，实施二次抽水试验，若仍然存在 $K > K'$ ，则继续开展废弃煤矿井筒(1)井壁的重构再造，分节预制完整井壁并通过沉井法再造形成比原废弃井筒小但同轴的内井壁，保持再造内井壁与原井壁厚度相同，内井壁所形成新的储水储热段用于矿井水储热；根据重构改造后的井筒参数、地面供热负荷和储热期热损失确定井筒矿井水储热容积；

[0016] 以井筒内矿井水体和井筒周围地层作为联合储热体，考虑储热矿井水体积及周围岩土的热容量与储热热源热量、冬季采暖建筑热负荷及储热系统热损失有关，采用如下方法确定井筒矿井水储热容积：假定冬季采暖建筑供热面积所需的热负荷 $Q_{load}$ ，井筒矿井水储热热量来源于太阳能，由太阳能总集热量 $Q_c$ 和井筒矿井水储热系统的储热量 $Q_s$ 克服储热损失 $Q_{loss}$ 提供，则有： $Q_{load} = Q_c - Q_{loss} + Q_s$ ；

[0017] 在太阳能跨季节地下储热系统的初期阶段，太阳能集热器向矿井井筒内水体输送热量，使水温逐渐上升；这些热量从水体中传递到井筒周围地层，使得接触水体的岩土温度上升；较暖的岩土将热量进一步传播到更广泛的区域；

[0018] 当进入供暖季节时，由于持续的热量抽取，井筒内矿井水体的温度逐步下降；此时太阳能集热器向围岩地层传递的热量远大于从围岩地层中回收的热量，即 $Q_{loss} > 0$ ；

[0019] 随着系统的长期运行，形成井筒水体及地层围岩储热层；在供暖季节，如果井筒水体温度因取热而下降，这时围岩地层将其储存的热量释放给井筒水体，使井筒水体温度逐渐回升，围岩地层发挥储热作用，即热量流出围岩的 $Q_{loss} < 0$ ，故存在 $Q_{loss}$ 趋于零的过渡时期，这时井筒水体接收的热量与围岩地层释放的热量达到动态平衡；如果此时停止热量的注

入,系统将维持这种平衡状态,则有:  $\rho c_p \dot{V}(T - T_0) + Q_{wc} = Q_{load}$ ;

[0020] 式中,  $\rho$ 为矿井水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为恒压比热容,单位  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为井筒水体温度;  $T_0$ 为冬季室内要求温度;  $Q_{wc}$ 为冬季该时刻集热量;  $\dot{V}$ 为该时刻取水流量,单位  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

[0021] 井筒矿井水储热容积  $V$ 根据取水流量和规定的该时刻的换水次数  $n$ 确定:

$$V = \dot{V}/n;$$

[0022] 步骤五、根据所选择的废弃煤矿井筒,建立井筒及周围地层几何模型和数值计算模型控制方程,设置不同工况参数及组合,包括井筒矿井水储热容积、进水管和出水管位置、初始及目标温度、废弃煤矿井筒及地层渗透系数等边界和初始条件参数;采用数值模拟软件开展基于3D水文地质模型的井筒矿井水储热方案数值仿真实验,分析矿井水储热温度衰减变化规律、确定最优渗透系数、储热作用半径、储热用热循环周期特征及参数组合方案,综合分析废弃煤矿井筒矿井水储热可利用性;

[0023] 其中,井筒内流体在加热和蓄热过程中,对流传热遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,基本控制方程表达如下:

[0024] 质量守恒方程在流体力学中表述为连续性方程,即流体微元体在单位时间内质量的增加,等于同样间隔时间内流入该微元体的净质量,其微分表达式如下式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0;$$

[0025] 式中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别代表流体微团在  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的速度分量,单位  $\text{m}/\text{s}$ ;

[0026] 动量守恒即微元体中流体的动量随时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种外力之和,对于粘性不可压缩流动,又称纳维-斯托克斯方程,其在  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的

$$\text{动量方程如下: } \begin{cases} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y; \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases}$$

[0027] 式中,  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$ 分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向的速度分量,单位  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\tau$ 是微元体表面的切向应力,单位  $\text{pa}$ ;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向的单位质量力,单位  $\text{m}/\text{s}^2$ ;

[0028] 能量守恒方程:  $\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}T) = \nabla \cdot (a \nabla T) + S_T + Q_V$ ;

[0029] 式中,  $a$ 为热扩散率,单位  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $a = \lambda/\rho c_p$ ,其中,  $\lambda$ 为流体的传热系数,单位  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $S_T$ 为黏性耗散项;  $Q_V$ 为体积热源;

[0030] 对于井筒围岩,在初步研究中仅看作固体,不考虑多孔介质的渗流流动换热对蓄热的影响,此时围岩的能量守恒方程为非稳态导热微分方程,即:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right);$$

[0031] 进一步地,所述步骤五中进水管和出水管位置的确定采用等圆环面法确定,过程如下:

[0032] 对内径为 $D$ 的井筒,进水管和出水管在同一井筒圆形横断面直径线上,进水管和出水管分别居于井筒中心两侧,其布管位置采用下式计算:

$$r_{2i-1} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{2i-1}{2N}};$$

[0033] 式中, $i$ 为等圆环面的序号,从井筒横断面圆的圆心开始, $i=1,2,3 \dots$ ;  $N$ 为圆环面的等分数或个数, $N=1,2,3 \dots$ ,同一储水井筒高度下每个圆环下储存的矿井水体积相等。

[0034] 进一步地,所述步骤五中3D数值模拟几何模型的选择分为包含井筒和全矿井范围的非规则几何结构模型以及包含井筒和附近地层的圆柱体/立方体/长方体规则几何结构模型两类。

[0035] 本发明根据废弃煤矿井筒具体情况,利用封闭加固措施建立合适的储水储热系统,实现了废弃煤矿井筒蓄水储热段的正常水循环运行与能量交换。通过对废弃煤矿井筒生产-闭坑参数调查、对废弃煤矿井筒钻孔启封与探测窥视、基于废弃煤矿井筒抽水试验的水文地质参数计算、封闭加固注浆、井壁重构再造及容积确定、3D水文地质和抽灌方案储热效果模拟,可以实现不同工业余热源的存储及能量的季节尺度延时转换,相比现有的储能系统更加环保且原理简单,易于实现。本系统采用高效率的储能方式,即采用物理介质进行储能,使用寿命较长,对选址要求低,不额外占用地面空间,建设成本低;与传统热储能系统相比,本发明减少了储能系统初期投资,扩大了系统适用范围,在有效解决水渗漏、热损失等储热工程问题的同时综合利用了废弃煤矿井筒和地下浅层地热能,降低了储热成本,提高了储热效率,实现了废弃煤矿井筒的二次利用,有助于加快形成废弃煤矿转型发展新质生产力。

## 附图说明

- [0036] 图1是本发明的结构示意图;
- [0037] 图2是本发明的方法流程图;
- [0038] 图3是等圆环面法的示意图;
- [0039] 图4是本发明实施例通过等圆环面法确定的进水管和出水管位置示意图;
- [0040] 图5是本发明实施例的矿井二维平面图;
- [0041] 图6是本发明实施例的全矿井3D地层图;
- [0042] 图7是本发明实施例的网格图;
- [0043] 图8是本发明实施例的3D数值模型长方体规则几何结构网格剖分示意图;
- [0044] 图9是本发明实施例井筒储存热水经过四个月后的轴向截面温度分布图;
- [0045] 图10是本发明实施例井筒储存热水经过四个月后的径向截面温度分布图;
- [0046] 图11是本发明实施例井筒顶部的水体截面的温度云图;
- [0047] 图12是本发明实施例井筒底部的水体截面的温度云图。



[0048] 图中:1、井筒, 2、水平巷道, 3、封填段, 4、密封段, 5、储水储热段, 6、进水管, 7、出水管, 8、水平管路, 9、注浆液。

### 具体实施方式

[0049] 下面结合附图对本发明作进一步说明。

[0050] 如图1所示, 一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热装置, 包括废弃煤矿井筒1, 所述废弃煤矿井筒1底部与水平巷道2连通处设有封填段3, 顶部设有密封段4, 封填段3与密封段4之间的井筒为储水储热段5; 在所述密封段4上沿其径向开设两个分别用于埋设进水管6和出水管7的通孔, 所述进水管6下端伸入至储水储热段5靠近底部位置处, 出水管7下端伸入至储水储热段5靠近顶部位置处; 进水管6上端和出水管7上端伸出密封段4顶部。

[0051] 作为一种优选的实施方式, 所述的进水管6和出水管7关于废弃煤矿井筒1中心轴对称, 且进水管6和出水管7距离废弃煤矿井筒中心轴的距离均为 $\sqrt{2}/4D$ ,  $D$ 为井筒内径; 进水管6伸入至储水储热段5距离封填段3顶部 $H/4$ 位置处,  $H$ 为储水储热段5的高度; 出水管7伸入至储水储热段5距离密封段4底部 $H/4$ 位置处。

[0052] 为了使进水与井筒内的水实现更均匀的混合, 防止产生热分层, 所述的进水管6下端连通有延伸至井筒1中心轴所在处的水平管路8。

[0053] 为进一步降低井筒壁后注浆加固地层导热系数及与井筒内矿井水总传热系数, 所述的储水储热段5的井筒通过壁后注浆进行加固并在注浆液9内添加低导热系数纳米材料; 为了进一步提高储水储热段5的密封性, 所述密封段4为密封井盖, 其直径至少比井筒1直径大2m, 其厚度大于1m。

[0054] 如图2所示, 一种基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热方法, 包括如下步骤:

[0055] 步骤一、开展废弃煤矿井筒1的生产、闭坑参数调查, 包括矿井主要生产技术资料图、矿井的位置坐标、矿井的类型、矿井井管材质、矿井井径、矿井井深、矿井结构图、井筒地层剖面图、井筒地层水文地质资料、闭坑封井施工设计及竣工报告; 其中, 矿井主要生产技术资料图包括井上井下对照图、采掘工程平面图和工业场地平面布置图;

[0056] 步骤二、对废弃煤矿井筒1的完整性进行评估, 包括井筒1密封段中心钻孔启封、井壁混凝土取样、井筒矿井水取样、井筒矿井水水位监测、井壁完整性和井巷连通性探测、井筒密封段中心钻孔再密封, 其中, 井壁完整性和井巷连通性均通过水下摄像头窥视; 根据现场条件开展井筒1矿井水温盐深剖面监测, 完成废弃煤矿井筒1完整性及可利用性评估报告;

[0057] 步骤三、对于步骤二确定的可利用的废弃煤矿井筒1, 安设矿用潜水泵, 通过开展大直径井筒1内钻孔单孔、大流量稳定流抽水试验, 获得流量-时间、水位降深-时间曲线, 通过以下标准公式迭代计算废弃煤矿井筒1抽采影响半径 $R$ 、渗透系数 $K$ 等井筒1地层水文地质参数:

$$\text{文地质参数: } \begin{cases} R = 10S\sqrt{K} \\ K = \frac{0.336q}{SM} \ln \frac{R}{r} \end{cases};$$

[0058] 式中,  $q$ 为抽水流量, 单位 $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $S$ 为降深, 单位 $\text{m}$ ;  $r$ 为井筒半径, 单位 $\text{m}$ ;  $M$ 为井深, 单位 $\text{m}$ ;

[0059] 步骤四、根据井筒抽水试验结果, 若获得的 $K \leq K'$ , 其中,  $K'$ 为生产时期井筒地层

渗透系数,则认定为废弃煤矿井筒1矿井水储热存在类水封效应,忽略矿井水通过井筒1井壁的渗流对储热性能的影响;

[0060] 若获得的 $K > K'$ ,则认定为废弃煤矿井筒1井壁发生破裂、井筒变形,井筒矿井水及周围地层地下水的渗流运移明显,影响井筒矿井水储热效果,结合废弃井筒1井壁完整性探测窥视结果,对井壁破损点采取水下喷射混凝土、壁后注浆封闭加固井壁措施,其中壁后注浆措施中的注浆液9中添加低导热系数纳米材料;继续进一步开展措施效果检验,实施二次抽水试验,若仍然存在 $K > K'$ ,则继续开展废弃煤矿井筒1井壁重构再造,预制完整井壁并通过沉井法再造形成比原废弃井筒1小但同轴的内井壁,保持再造内井壁与原井壁厚度相同,内井壁所形成新的储水储热段用于矿井水储热;根据重构改造后的井筒1参数、地面供热负荷和储热期热损失确定井筒1矿井水储热容积;

[0061] 以井筒1内矿井水体和井筒1周围地层作为联合储热体,考虑储热矿井水体积及周围岩土体的储热量与储热热源热量、冬季采暖建筑热负荷及储热系统热损失有关,采用如下方法确定井筒1矿井水储热容积:假定冬季采暖建筑供热面积所需的热负荷 $Q_{load}$ ,由太阳能总集热量 $Q_c$ 和井筒1矿井水储热系统的储热量 $Q_s$ 克服储热损失 $Q_{loss}$ 提供,则有:

$$Q_{load} = Q_c - Q_{loss} + Q_s;$$

[0062] 在太阳能跨季节地下储热系统的初期阶段,太阳能集热器向矿井井筒1内水体输送热量,使水温逐渐上升;这些热量从水体中传递到井筒1周围地层,使得接触水体的岩土温度上升;较暖的岩土将热量进一步传播到更广泛的区域;

[0063] 当进入供暖季节时,由于持续的热量抽取,井筒1内矿井水体的温度逐步下降;此时太阳能集热器向围岩地层传递的热量远大于从围岩地层中回收的热量,即 $Q_{loss} > 0$ ;

[0064] 随着系统的长期运行,形成井筒1水体及地层围岩储热层;在供暖季节,如果井筒1水体温度因取热而下降,这时围岩地层将其储存的热量释放给井筒1水体,使井筒1水体温度逐渐回升,围岩地层发挥储热作用,即热量流出围岩的 $Q_{loss} < 0$ ,故存在 $Q_{loss}$ 趋于零的过渡时期,这时井筒1水体接收的热量与围岩地层释放的热量达到动态平衡;如果此时停止热量的注入,系统将维持这种平衡状态,则有: $\rho c_p \dot{V}(T - T_0) + Q_{wc} = Q_{load}$ ;

[0065] 式中, $\rho$ 为矿井水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为恒压比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为井筒(1)水体温度; $T_0$ 为冬季室内要求温度; $Q_{wc}$ 为冬季该时刻集热量; $\dot{V}$ 为该时刻取水流量,单位 $\text{m}^3/\text{h}$ ;

[0066] 井筒矿井水储热容积 $V$ 根据取水流量和规定的该时刻的换水次数 $n$ 确定:

$$V = \dot{V}/n;$$

[0067] 步骤五、根据所选择的废弃煤矿井筒1,建立井筒1及周围地层几何模型和数值计算模型控制方程,设置不同工况参数及组合,包括井筒1矿井水储热容积、进水管6和出水管7位置、初始及目标温度、废弃煤矿井筒1及地层渗透系数等边界和初始条件参数;采用数值模拟软件开展基于3D水文地质模型的井筒1矿井水储热方案数值仿真实验,分析矿井水储热温度衰减变化规律、确定最优渗透系数、储热作用半径、储热用热循环周期特征及参数组合方案,综合分析废弃煤矿井筒1矿井水储热可利用性;

[0068] 其中,井筒1内流体在加热和蓄热过程中,对流传热遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,基本控制方程表达如下:

[0069] 质量守恒方程在流体力学中表述为连续性方程,即流体微元体在单位时间内质量的增加,等于同样间隔时间内流入该微元体的净质量,其微分表达式如下式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0;$$

[0070] 式中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别代表流体微团在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的速度分量,单位  $m/s$ ;

[0071] 动量守恒即微元体中流体的动量随时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种外力之和,对于粘性不可压缩流动,又称纳维-斯托克斯方程,其在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的

$$\text{动量方程如下: } \begin{cases} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y; \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases}$$

[0072] 式中,  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的速度分量,单位  $m/s$ ;  $\tau$  是微元体表面的切向应力,单位  $pa$ ;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的单位质量力,单位  $m/s^2$ ;

[0073] 能量守恒方程:  $\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}T) = \nabla \cdot (a\nabla T) + S_T + Q_V$ ;

[0074] 式中,  $a$  为热扩散率,单位  $m^2/s$ ,  $a = \lambda/\rho c_p$ , 其中,  $\lambda$  为流体的传热系数,单位  $w/(m \cdot K)$ ;  $S_T$  为黏性耗散项;  $Q_V$  为体积热源;

[0075] 对于井筒1围岩,在初步研究中仅看作固体,不考虑多孔介质的渗流流动换热对蓄热的影响,此时围岩的能量守恒方程为非稳态导热微分方程,即:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right);$$

[0076] 作为一种优选的实施方式,所述步骤五中,进水管6和出水管7位置的确定采用等圆环面法确定,过程如下:

[0077] 如图3所示,对内径为  $D$  的井筒1,进水管6和出水管7在同一井筒1圆形横断面直径线上,进水管6和出水管7分别居于井筒1中心两侧,其布管位置采用下式计算:

$$r_{2i-1} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{2i-1}{2N}};$$

[0078] 式中,  $i$  为等圆环面的序号,从井筒1横断面圆的圆心开始,  $i=1, 2, 3, \dots$ ;  $N$  为圆环面的等分数或个数,  $N=1, 2, 3, \dots$ , 同一储水井筒高度下每个圆环下储存的矿井水体积相等。

[0079] 式中,  $i$  为等圆环面的序号,从井筒1横断面圆的圆心开始,  $i=1, 2, 3, \dots$ ;  $N$  为圆环面的等分数或个数,  $N=1, 2, 3, \dots$ , 同一储水井筒高度下每个圆环下储存的矿井水体积相等。

[0080] 如图4所示,本发明实施例中,  $N=1$ , 即井筒1横断面圆内仅存在1个圆环,同时也是

井筒断面圆,对应只有进水管6和出水管7两个水管,那么当 $i=1$ 时其位置定位

$$r_1 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{4} D。$$

[0081] 作为一种优选的实施方式,所述步骤五中,3D数值模拟几何模型的选择分为包含井筒和全矿井范围的非规则异形几何结构模型以及包含井筒和附近地层的圆柱体/立方体/长方体规则几何结构模型两类。

[0082] 作为其中一种优选的实施方式,所述步骤五中,3D数值模拟几何模型可选择全矿井范围大尺度非规则几何形状,首先根据矿井地质地形图采用SketchUp软件绘制全矿井范围曲线,再导入SolidWorks软件绘制如图5所示的矿井二维平面图,通过多层多次拉伸,建立全矿井3D地层图如图6所示,最后划分如图7所示的网格图,开展数值模拟计算。

[0083] 作为另一种优选的实施方式,所述步骤五中,3D数值模拟几何模型可选择如图8所示的井筒附近地层小尺度方柱规则几何形状,直接根据地层数据划分网,开展数值模拟计算。

[0084] 实施例:根据相应地质条件和矿井开拓情况,建立该装置的主要组成及连接方式。以徐州某废弃矿井为例,该矿井直径5.2m,井深230m,井筒混凝土井壁厚350mm。

[0085] 徐州位于中国苏北地区,在5月到9月初的夏季期间,由于日照强度较高,太阳辐射能够产生大量的热能。这里的建筑可以利用附近已关闭的煤矿井水作为水源,这种水源的温度和水量都相对稳定。通过结合太阳能集热器、低等级的工业余热、地面上的光伏电板、风能,以及数据中心的排热,可以加热井筒1里储存的矿井水。随着时间的推移,井筒1中的热量将传递到周围的含水层和其他岩层,这样,水和岩石共同作为储热介质来储存热量;

[0086] 9月至11月中旬过渡季,气候逐渐变凉,建筑物的热能需求相对较低,可以采用低功率运行系统或者间断停止充热。可以考虑将供暖系统的功率降低,或者选择在一天中的某些时段完全停止供暖,以节省能源。可根据室内外温度差和预期的热舒适度自动调节供暖强度,或者在夜间和非高峰时段暂停供暖,以优化能源使用效率;

[0087] 在11月底到3月初的冬季供暖期间,主要利用井筒1内水的热量进行循环供暖。这个过程中,需要考虑两种不同的情况:一、对于夏季回灌的30至40摄氏度的中低温水,它利用了地下井筒1和周边岩石的稳定温度储热特性,即使经过过渡季节,这种水的平均温度仍可保持在20摄氏度以上。由于矿井水源热泵的性能系数COP高于空气源热泵,且供热水温度更高,因此它是一个效率更高的热源;二、当井筒1蓄水的温度在一段时间后低于周围岩石的温度时,岩石会释放其储存的热量给井筒1内的水体,这样就充分利用了岩体的储热功能。在这种情况下,主要是间接利用地热能作为热泵的热源。而对于储存的50至60摄氏度的高温热水,如果几个月的储热后能够将水温维持在40至50摄氏度即温度衰竭 $<10$ 度,这将满足低温热水地面辐射供暖系统的供水温度需求。

[0088] 本实施例采用平板型集热器,拟先采用显热进行储热,以井筒1内水体和外壁围岩作为联合储热体,研究流固耦合蓄-放热特性。考虑到储热水池体积及周围岩土储热量与太阳能集热器集热量、建筑热负荷及储热系统热损失有关。本设计假定建筑供热面积所需的热负荷 $Q_{load}$ ,由太阳能总集热量 $Q_c$ 和井筒矿井水储热系统的储热量 $Q_s$ 克服储热损失 $Q_{loss}$ 提供,则有:  $Q_{load} = Q_c - Q_{loss} + Q_s$ ;

[0089] 在太阳能跨季节地下储热系统的初期阶段,特别是在非供暖季节,太阳能集热器持续地向井筒1内矿井水体输送热量,使水温逐渐上升。这些热量从水体中逐步传递到井筒1周围的地层,使得接触水体的岩土温度略有上升。随着这个过程的持续,较暖的岩土将热量进一步传播到更广泛的区域。然而,当进入供暖季节时,由于持续的热量抽取,水体的温度会逐步下降。此时太阳能集热器向围岩传递的热量远大于从围岩中回收的热量,即 $Q_{loss}$ 大于零。随着系统的长期运行,会形成一个稳定的、温度较高的井筒1水体及地层围岩储热层。在供暖季节,如果水体温度因抽热而下降,这时围岩就会将其储存的热量释放给水体,使水体温度逐渐回升。在这个时期,围岩发挥了储热作用,即热量流出围岩的 $Q_{loss}$ 小于零。因此,存在一个 $Q_{loss}$ 趋于零的过渡时期,这时水体接收的热量与围岩释放的热量达到动态平衡。如果此时已经停止了热量的注入,系统将维持这种平衡状态。则有:

$$\rho c_p \dot{V}(T - T_0) + Q_{wc} = Q_{load};$$

[0090] 式中, $T$ 为井筒水体温度; $T_0$ 为冬季室内要求温度; $Q_{wc}$ 为冬季该时刻集热量; $\dot{V}$ 为该时刻取水流量,单位 $m^3/h$ ;则井筒矿井水储热容积 $V$ 根据取水流量和规定的该时刻的换水次数 $n$ 确定: $V = \dot{V}/n$ ;

[0091] 在计算矿区周围建筑逐时热负荷和有效集热量后,可以确定合适的储热水体的容积。经计算,本例中经验证计算可建立高110m、蓄水容积约为2336 $m^3$ 的井筒1矿井水储热容积;

[0092] 采用仿真软件,如COMSOL Multiphysics 6.0 对废弃矿井井筒1重构建成的地下蓄水池储热过程中井筒1和围岩的流动传热进行数值建模,作为后面多工况数值模拟研究的基础。

[0093] 设置井筒1周围的地质层共三层,长度和宽度均为100m,深度为200米。使用SolidWorks建立井筒1蓄水的几何模型。设地下0-30m为不透水的粘土不透水层;中间为厚度约58.5m的细砂岩承压含水层,含有地下水;下层岩石厚41.5m,为深灰色的粉砂质泥岩隔水层,块状泥质结构,透水性较差。在本具体实施例中,可假定地层表面平坦,并构建一个三维非稳态的井筒1蓄水储热模型。模型主要关注井筒1的储热区域,位于地下20m至130m,并计算注热结束后的过渡季节,持续时间为四个月。岩层的计算范围是根据地下储热的有效热作用半径确定的。采用了非结构化网格,并且用户可以控制,以确保网格划分贴近实际的物理场景。在地层界面、水管进出口、水池交界处以及流体与井筒1壁的接触面,网格需要进行局部细化,以提高计算精度。而对于其他对计算结果影响不大的岩石区域,则可以使用较为稀疏的网格。由于井筒1壁和保温层的厚度相对较薄,在COMSOL中通过多层材料的链接来设置薄层结构,既可以保证数值模拟的准确性,又可以减少对计算资源的需求和模拟时间。

[0094] 在初步模拟中,忽略注入期,假设集热器储热初始阶段停止加热,即假设井筒1内充满热水作为热源向围岩散热,研究井筒1在不同地层中的蓄热作用半径。由于系统为非稳态传热过程,为获得理想的数值模拟结果,在建立几何模型、网格划分和确定基本控制方程后,首先要确定合理的初始和边界条件。模拟设置的边界条件如下:

[0095] (1) 由于井筒1轴向的两端面积远小于井筒1侧壁面面积,设置井筒1和围岩的顶部

和底部两端为绝热面,即:  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-20} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-130} = 0$ ;

[0096] (2) 由于在井筒1水体蓄热的过程中,热量向围岩扩散的速率较慢,故将围岩远端设置为恒定温度条件,保持一定的温度分布,不受传热影响。一般地,地面以下20~30m为岩层恒温带,恒温带以下岩层越深温度越高,地面上气候变化对地下也几乎不造成影响。对于徐州地区,恒温带温度可取为16.8℃,恒温带以下的平均地温梯度为2.3K/hm,因此围岩底部z=-130m远端温度取19.1℃,高度为z处围岩远端温度表达式通过自定义函数UDF设置为:

$$T(z) = \begin{cases} 289.95, & -30 < z < -20 \\ 289.95 - 0.023(z + 30), & -130 < z \leq -30 \end{cases};$$

[0097] 对于充热期,设置注水口为速度入口,速度大小设置参数 $V_i$ ;共轭传热分别设置流入和流出边界条件;实际运行时要根据集热系统确定上游温度,编写UDF作为边界条件实现集热系统和蓄热系统的联合运行;排水口为压力出口,相对压力设为0 Pa。

[0098] 本次模拟停止充热后,初始值设置为: $\tau = 0$ 时,上部岩层温度为16.8℃,中间岩层和下部岩层地温梯度为0.023 K/m;井筒1蓄水段充满温度为50℃的水;工作压力为101325Pa,速度为0;重力加速度为 $g = -9.81\text{m/s}^2$ ,方向沿Z轴负方向。

[0099] 对于日照强度充足期的井筒1充热过程,进水管6往井筒1底部注水,井筒1内的冷水与注入的热水混合后不断被加热,因此是强迫对流和自然对流共存的混合对流过程,并以自然对流为主;对于注热期结束后的蓄热过程则是与围岩间的自然对流散热过程,因此采用非等温流动的多物理场耦合。为更加准确的模拟热分层现象,假设井筒1内水的流动为不可压缩层流流动,在由温差引起的流体密度变化较小的情况下,可以采用Boussinesq近似。此时,动量方程中的密度是温度的函数,即用 $\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$ 代替方程中的 $\rho$ ,

其中 $\beta$ 为热膨胀系数, $\rho_0$ 为水的密度,而其他方程中密度视作常数,定性温度取热水与围岩初始温度的算术平均温度。对于COMSOL中不可压缩流动的自然对流模拟,可以通过设置重力和使用约化压力实现Boussinesq近似。围岩热物理性质如下:

表 1 围岩热物理性质

围岩种类	密度: $\text{kg/m}^3$	导热系数: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	恒压比热容: $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
细砂岩	1800	$0.341467+0.00573*T$	870
粉砂质泥岩	2500	$6.775-0.01503*T+1.075E-5*T^2$	900
粘土	1285	0.8	$232.023594+1.921*T$

[0100] 在数值模型计算过程中,网格质量对于模拟结果的准确性与可靠性有很大影响。一般来说,网格单元尺寸越小、单元数越多,计算的结果越准确。然而,网格数过于密集,对计算机性能要求也越高,会增加计算机的计算量,延长计算周期;同时对于COMSOL有限元分析软件,也并非网格越密,收敛性越好。但若网格质量过于稀疏,虽然计算量下降,但计算结

果与实际偏离,误差过大。因此,为了尽可能减少网格数量对计算结果的影响,在仿真计算中,往往要进行网格无关性验证以找到合适的网格数量。

[0102] 对上述的数值模型进行网格无关性验证。在网格单元数分别为98082、176245、255094和348632的情况下,分别对模型中井筒1蓄水段内部测点1( $X=0m, Y=0m, Z=-20m$ )、测点2( $X=2.8m, Y=0m, Z=-75m$ )和围岩中测点3( $X=5m, Y=0m, Z=-20m$ )处在散热720h时的温度进行监测,将计算结果进行对比,如表2所示:

表2 网格无关性验证

测点温度 \ 网格数	98082	176245	255094	348632
T1 (°C)	49.37	49.49	49.58	49.61
T2 (°C)	31.35	31.18	31.12	31.13
T3 (°C)	21.76	21.34	21.22	21.19

[0104] 由此可知,当网格数量由98082个到176245个时,三个测点中最大温度变化率为1.93%;当网格数量从176245到255094时,三个测点中最大温度变化率为0.56%;当网格数量从255094到348632时,三个测点中最大温度变化率仅为0.14%。当在更多的网格数量需要更长的计算时间和更多的计算内存的情况下,为节省计算资源同时确保模拟的准确性,选取数量为255094的计算网格较为合适。网格剖分如图8所示。

[0105] 取围岩长、宽为100m,高110m,储存热水经过四个月后的 $xoz$ 轴向、 $xoy$ 径向截面温度分布如图9和图10所示,井筒1顶部和底部水体截面的温度分布云图分别如图11和图12所示。

[0106] 由图9~图12可知:四个月后的温度分布呈中心向四周发散状,井筒1中心温度达最大值,从井筒1壁面开始向围岩外围逐渐减小,直到与正常岩石温度相等;由于温度不同引起密度差,井筒1内水体呈现明显的温度分层,经后处理计算,顶面平均温度为310.69K,底面平均温度305.81 K;上层围岩与下层围岩由于热扩散率等物理性质不同,受到蓄热的热作用半径(与围岩无穷远端温差最小且大于零的点至井筒1中心轴的距离)不同,平均热作用半径在16-18m,温度波及的直径为所取围岩边长的1/3左右。因此,在后续的研究中为了提高效率,在不影响结果正确性的情况下,对于井筒1注热期蓄热计算,可以将外围岩石直径取60m作为计算区域。

[0107] 上述模拟结果可以为基于重构改造废弃煤矿井筒的矿井水储热系统实施提供指导。

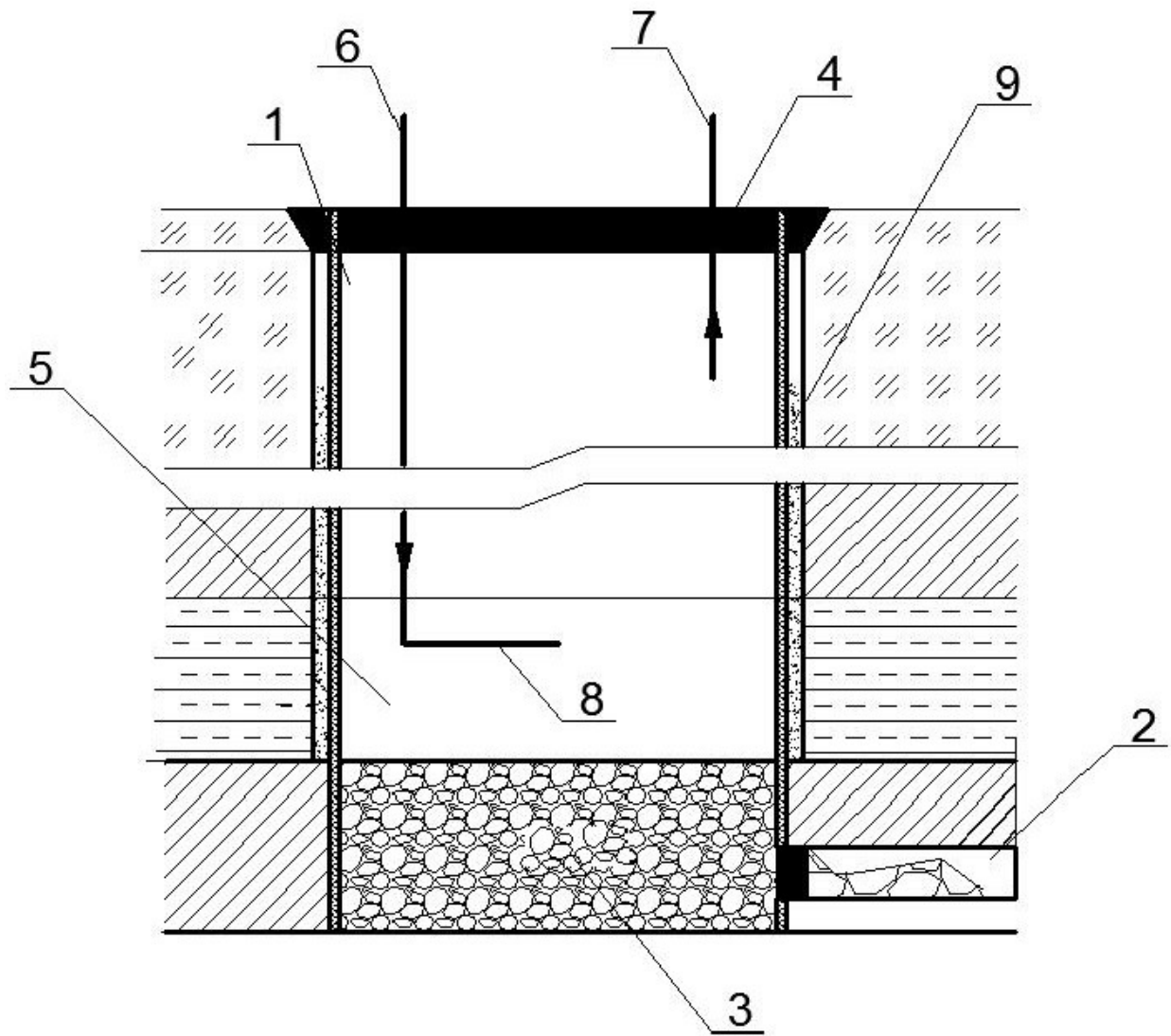


图 1



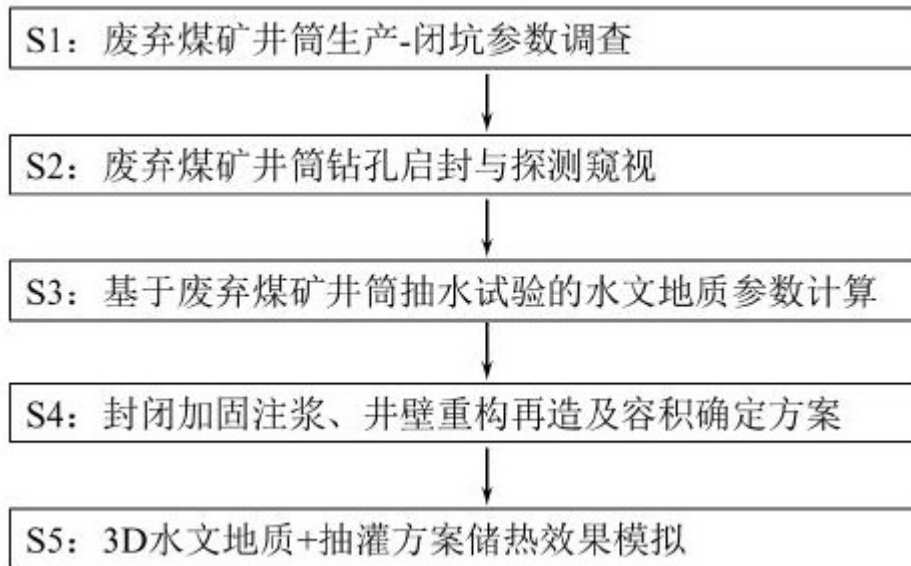


图 2

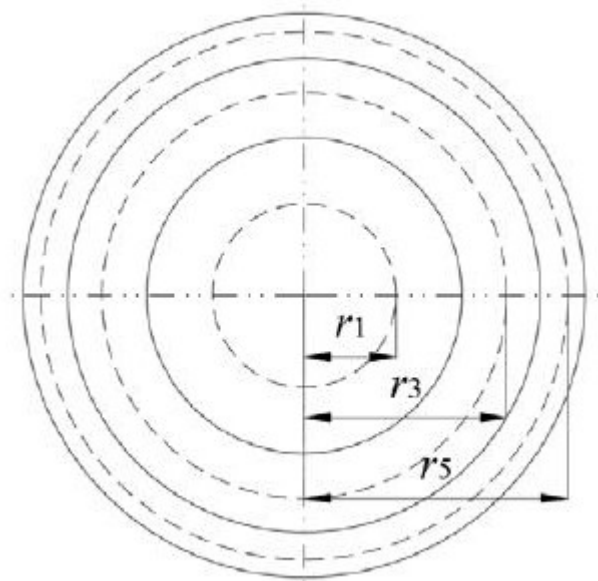


图 3

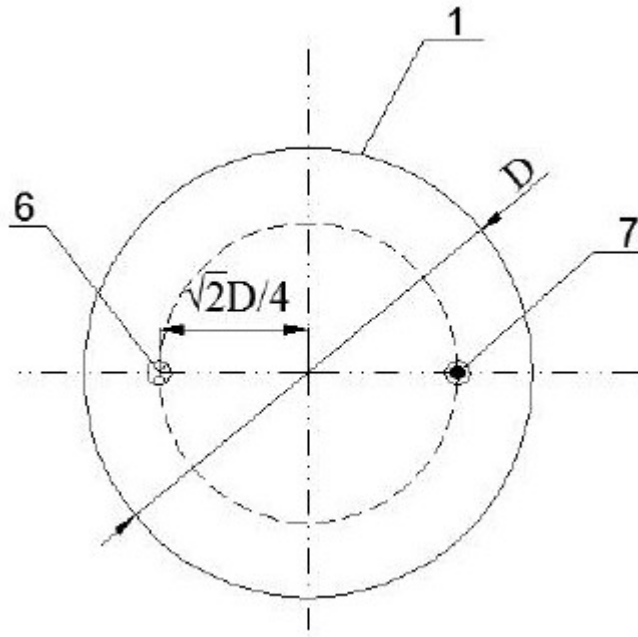


图 4



图 5

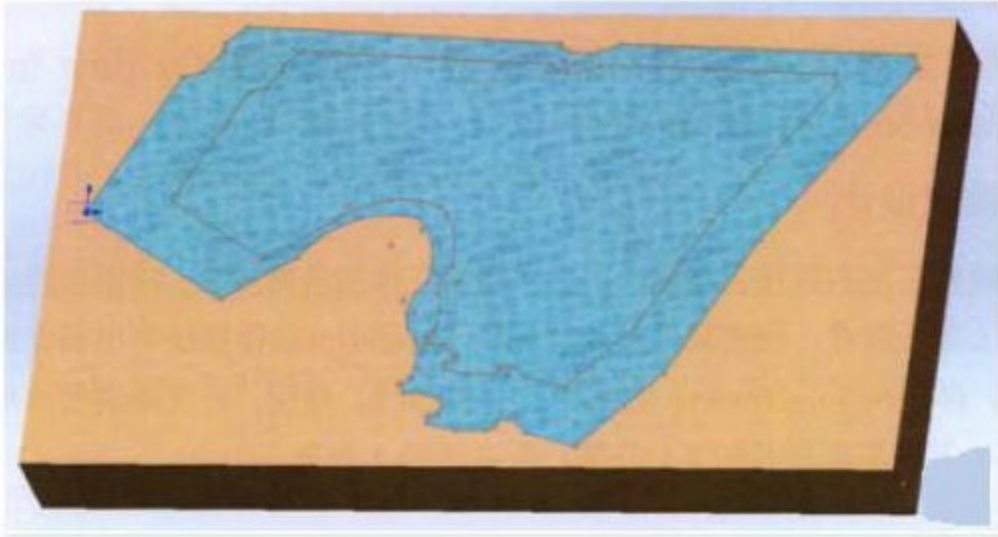


图 6

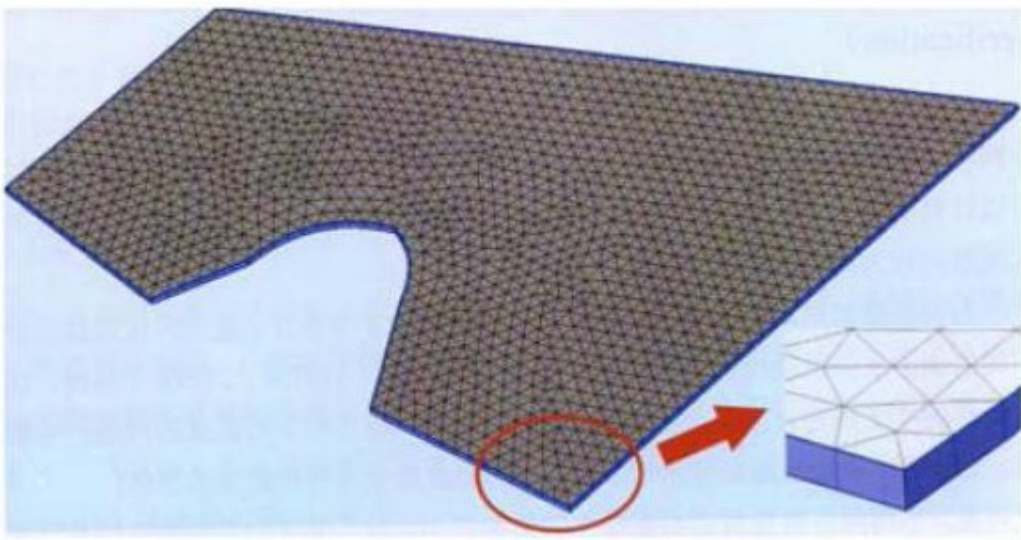


图 7

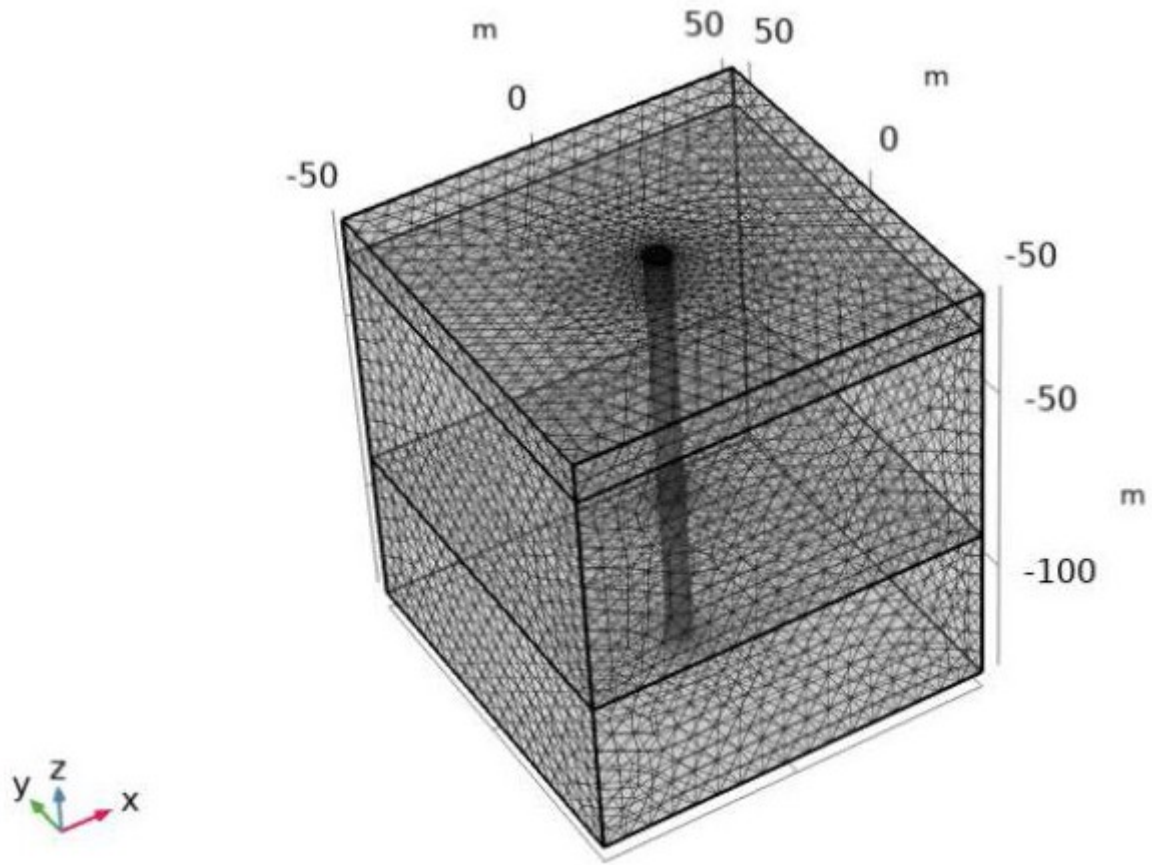


图 8

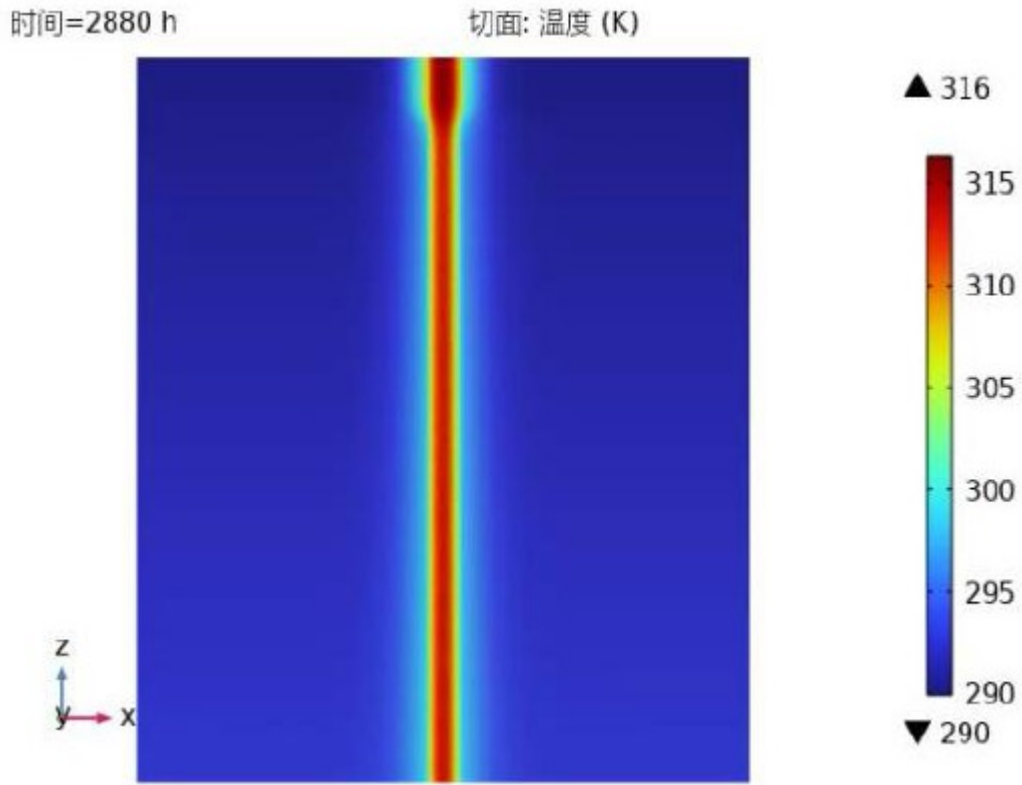


图 9

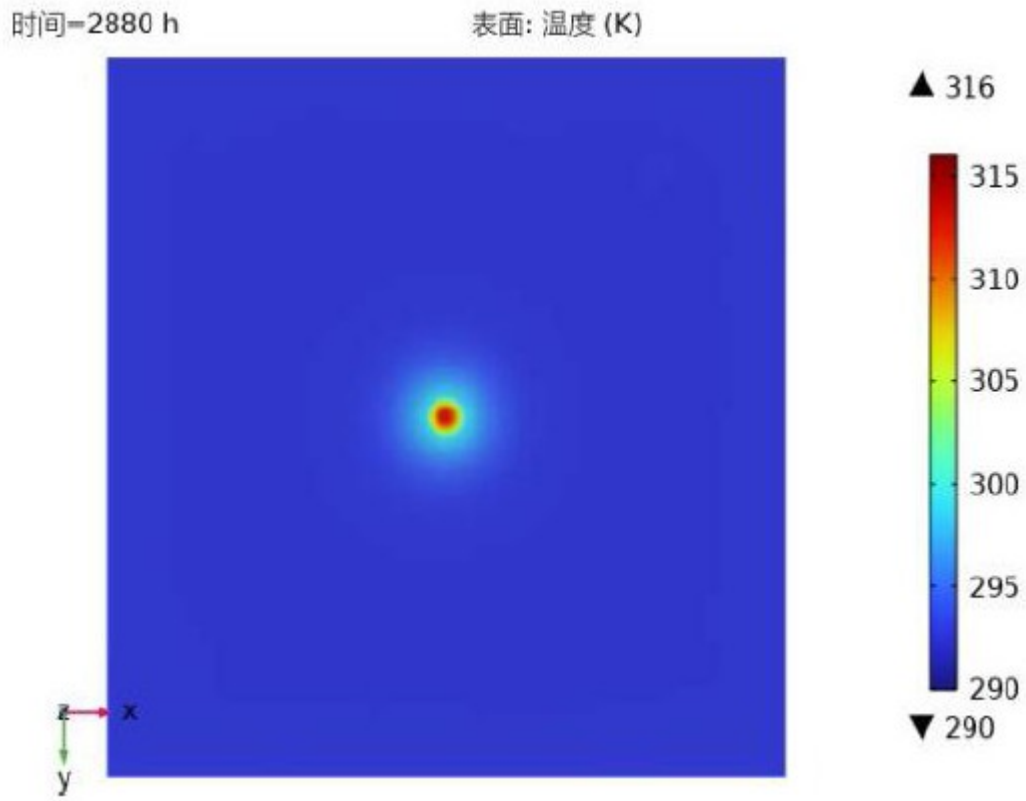


图 10

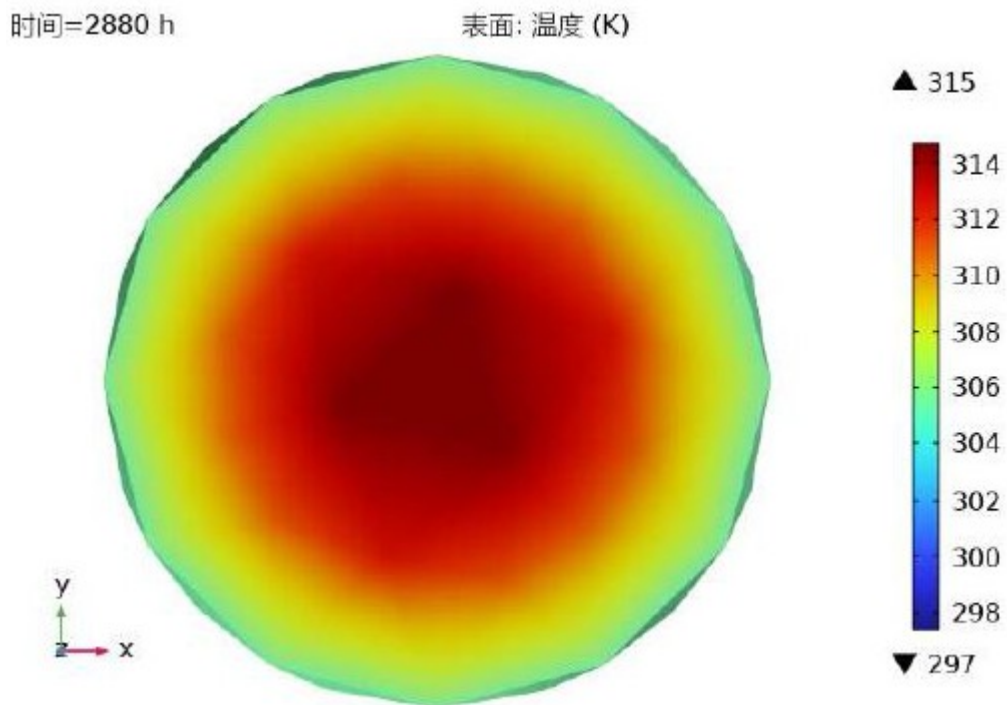


图 11

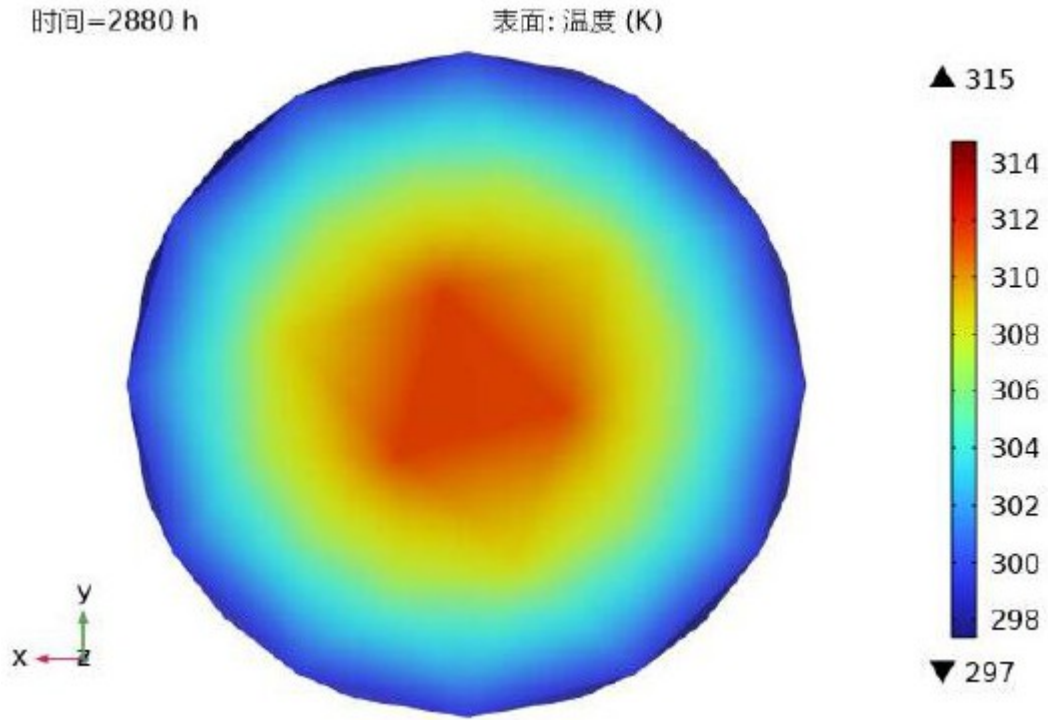


图 12