(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110926042 A
(43)申请公布日 2020.03.27

(21)申请号 201911002302.1

(22)申请日 2019.10.21

(71)申请人 西安科技大学
地址 710054 陕西省西安市雁塔路中段58号

(72)发明人 郇超 刘浪 李圣腾 周文武 赵玉娇 李双 张波 王美 张小艳 侯东壮 于群

(74)专利代理机构 西安启诚专利知识产权代理事务所(普通合伙) 61240
代理人 李艳春

(51)Int.Cl.
*F24T 10/15*(2018.01)
*E21F 3/00*(2006.01)
*E21F 15/00*(2006.01)

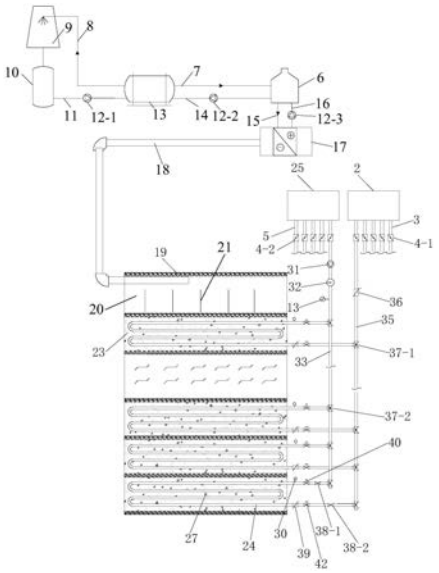
权利要求书5页 说明书13页 附图5页

(54)发明名称

固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置及方法

(57)摘要

本发明公开了一种固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,包括矿井地热开采利用装置和采场空气处理与运输装置,矿井地热开采利用装置包括进行各分层充填时形成的多层采热充填体,垂直铺设在采热充填体内的U型换热盘管和设置在地面上的分集水系统,以及用于连接所述分集水系统与U型换热盘管的供回水系统;采场层空气处理与运输装置包括地面冷水处理装置、空气处理机组和用于为矿井回采空间内送入新鲜空气的送风管;本发明还公开了一种固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法。本发明通过固流耦合协同降温作用,能够达到很好的采场降温效果,营造一个舒适的井下热环境;提高了地下换热系统的㶲值,实用性强,推广应用价值高。




CN 110926042 A

1.一种固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,其特征在于:包括矿井地热开采利用装置和采场空气处理与运输装置,所述矿井地热开采利用装置包括进行各分层充填时形成的多层采热充填体(23),垂直铺设在采热充填体(23)内的U型换热盘管(24)和设置在地面上的分集水系统,以及用于连接所述分集水系统与U型换热盘管(24)的供回水系统;所述分集水系统包括分水器(25)和集水器(2),所述分水器(25)上连接有多条分水支路(5),每条分水支路(5)上均设置有分水器蝶阀(4-2)和循环水泵(31),所述集水器(2)上连接有多条集水支路(3),每条集水支路(3)上均设置有集水器蝶阀(4-1)和集水器温度传感器(36);所述供回水系统包括设置在天井和竖井内的多条换热盘管供水管(33)和多条换热盘管回水管(35),所述换热盘管供水管(33)与分水支路(5)连接,所述换热盘管回水管(35)与集水支路(3)连接;

所述采场层空气处理与运输装置包括地面冷水处理装置、空气处理机组(17)和用于为矿井回采空间(20)内送入新鲜空气的送风管(18);所述地面冷水处理装置包括冷水机组(13)、冷却塔(9)、冷却塔水箱(10)和用于为空气处理机组(17)换热提供所需冷水的冷水蓄水箱(6),所述冷水机组(13)的冷却水进水口通过第一低温冷却水输送管(11-1)和设置在第一低温冷却水输送管(11-1)上的低温冷却水管流体输送动力泵(12-1)与冷却塔水箱(10)的出水口连接,所述冷水机组(13)的冷却水出水口通过高温冷却水输送管(8)与冷却塔(9)的进水口连接,所述冷却塔水箱(10)的进水口通过第二低温冷却水输送管(11-2)与冷却塔(9)的出水口连接;所述冷水蓄水箱(6)的侧面进水口通过冷水输送管(7)与冷水机组(13)的冷冻水出水口连接,所述冷水蓄水箱(6)的侧面出水口通过冷冻水回水管(14)和设置在冷冻水回水管(14)上的冷冻水回水管流体输送动力泵(12-2)与冷水机组(13)的冷冻水进水口连接;所述空气处理机组(17)包括从进风口到出风口的方向依次设置的一级空气过滤器(17-1)、二级空气过滤器(17-2)、表冷器(17-3)和送风机(17-4),所述表冷器(17-3)的进水口通过低温冷冻水管(15)与冷水蓄水箱(6)的下出水口连接,所述表冷器(17-3)的出水口通过高温冷冻水管(16)和设置在高温冷冻水管(16)上的高温冷冻水管流体输送动力泵(12-3)与冷水蓄水箱(6)的下进水口连接,所述送风管(18)的一端与空气处理机组(17)的出风口连接,所述送风管(18)的另一端通过天井、竖井通入井下并伸入各个矿井回采空间(20)内。

2.按照权利要求1所述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,其特征在于:还包括数据测量监控装置,所述数据测量监控装置包括监控立杆(21)、测量仪组、数据采集器(26)和计算机(1),所述监控立杆(21)的数量为多根且均匀布设在矿井回采空间(20)内,所述测量仪组包括用于测量矿井回采空间(20)内空气干球温度和相对湿度的的温湿度测量仪(22-1)、用于测量矿井回采空间(20)内热辐射强度的黑球温度计(22-2)、用于测量矿井回采空间(20)内空气流速的风速测量仪(22-3)和用于测量回采空间(20)内有害物浓度的有害物浓度测量仪(22-4),每根监控立杆(21)上均布设有温湿度测量仪(22-1)、黑球温度计(22-2)、风速测量仪(22-3)和有害物浓度测量仪(22-4),所述温湿度测量仪(22-1)的输出端、黑球温度计(22-2)的输出端、风速测量仪(22-3)的输出端和有害物浓度测量仪(22-4)的输出端均与数据采集器(26)的输入端连接,所述数据采集器(26)与计算机(1)相接。

3.按照权利要求2所述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,其特征在于:还包括换热盘管出口温度优化系统,所述换热盘管出口温度优化系统包括与计算机(1)相接

的控制器(28)，设置在底层的采热充填体(23)内且用于对底层的采热充填体(23)的温度进行实时检测的底层胶结充填体温度传感器(27)，设置在各层U型换热盘管(24)入口处且用于对U型换热盘管(24)入口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管入口温度传感器(30)和用于对U型换热盘管(24)内的流量进行调节的电磁流量调节阀(40)，以及设置在各层U型换热盘管(24)出口处的且用于对U型换热盘管(24)出口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管出口温度传感器(39)和用于对U型换热盘管(24)内的温度进行调节的电磁温度调节阀(42)；每层所述U型换热盘管(24)的入口均通过供水管三通阀(37-2)与换热盘管供水管(33)连接，每层所述U型换热盘管(24)的出口均通过回水管三通阀(37-1)与换热盘管回水管(35)连接；位于底层的U型换热盘管(24)的入口处设置有供水管截止阀(38-1)，位于底层的U型换热盘管(24)的出口处设置有回水管截止阀(38-2)；所述集水器温度传感器(36)、底层胶结充填体温度传感器(27)、U型换热盘管入口温度传感器(30)和U型换热盘管出口温度传感器(39)均与控制器(28)的输入端连接，所述分水器蝶阀(4-2)、集水器蝶阀(4-1)、循环水泵(31)、电磁流量调节阀(40)、电磁温度调节阀(42)、供水管三通阀(37-2)、回水管三通阀(37-1)、供水管截止阀(38-1)和回水管截止阀(38-2)均与控制器(28)的输出端连接。

4.按照权利要求3所述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，其特征在于：每条分水支路(5)上均设置有流量传感器(32)和压力表(34)，所述流量传感器(32)和压力表(34)的输出端均与控制器(28)的输入端连接。

5.按照权利要求3所述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，其特征在于：垂直铺设在采热充填体(23)内的U型换热盘管(24)在竖直方向上呈蛇形布设。

6.按照权利要求1、2或3所述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，其特征在于：所述采热充填体(23)包括分层交替设置的蓄热充填材料(23-1)，以及设置在顶部的硬化顶(23-3)和设置在蓄热充填材料(23-1)中的溜井(23-2)。

7.一种采用如权利要求2所述装置进行固流耦合协同降温的矿井地热开采利用的方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

步骤一、在地面上设置数据采集器(26)和与数据采集器(26)相接的计算机(1)，并进行采场空气处理与运输装置的施工；

步骤二、根据充填开采工艺进行矿块的采准、切割，形成天井、竖井和矿井回采空间(20)；

步骤三、将步骤一中施工的送风管(18)布置到矿井回采空间(20)内；

步骤四、在矿井回采空间(20)内均匀布设多根监控立杆(21)，在每根监控立杆(21)上均布设用于测量矿井回采空间(20)内空气干球温度和相对湿度的的温湿度测量仪(22-1)、用于测量矿井回采空间(20)内热辐射强度的黑球温度计(22-2)、用于测量矿井回采空间(20)内空气流速的风速测量仪(22-3)和用于测量回采空间(20)内有害物浓度的有害物浓度测量仪(22-4)，并将温湿度测量仪(22-1)、热辐射强度的黑球温度计(22-2)、风速测量仪(22-3)和有害物浓度测量仪(22-4)的输出端通过数据线与数据采集器(26)的输入端连接；

步骤五、分层进行回采和充填，形成多层采热充填体(23)，且在进行各层充填时，输入蓄热充填材料(23-1)进行充填的过程中，充填至需要设置U型换热盘管(24)的高度后，在蓄热充填材料(23-1)上铺设作业平板，铺设U型换热盘管(24)，U型换热盘管(24)铺设完成后

撤掉作业平板，并将U型换热盘管(24)的入口与换热盘管供水管(33)连接，将U型换热盘管(24)的出口与换热盘管回水管(35)连接；

步骤六、打开分水器蝶阀(4-2)、循环水泵(31)和集水器蝶阀(4-1)，分水器(25)向U型换热盘管(24)内通入流体，与采热充填体(23)进行热交换，热交换后的流体流入集水器(2)中。

8.按照权利要求7所述的方法，其特征在于：所述固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置还包括换热盘管出口温度优化系统，所述换热盘管出口温度优化系统包括与计算机(1)相接的控制器(28)，设置在底层的采热充填体(23)内且用于对底层的采热充填体(23)的温度进行实时检测的底层胶结充填体温度传感器(27)，设置在各层U型换热盘管(24)入口处且用于对U型换热盘管(24)入口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管入口温度传感器(30)和用于对U型换热盘管(24)内的流量进行调节的电磁流量调节阀(40)，以及设置在各层U型换热盘管(24)出口处的且用于对U型换热盘管(24)出口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管出口温度传感器(39)和用于对U型换热盘管(24)内的温度进行调节的电磁温度调节阀(42)；每层所述U型换热盘管(24)的入口均通过供水管三通阀(37-2)与换热盘管供水管(33)连接，每层所述U型换热盘管(24)的出口均通过回水管三通阀(37-1)与换热盘管回水管(35)连接；位于底层的U型换热盘管(24)的入口处设置有供水管截止阀(38-1)，位于底层的U型换热盘管(24)的出口处设置有回水管截止阀(38-2)；所述集水器温度传感器(36)、底层胶结充填体温度传感器(27)、U型换热盘管入口温度传感器(30)和U型换热盘管出口温度传感器(39)均与控制器(28)的输入端连接，所述分水器蝶阀(4-2)、集水器蝶阀(4-1)、循环水泵(31)、电磁流量调节阀(40)、电磁温度调节阀(42)、供水管三通阀(37-2)、回水管三通阀(37-1)、供水管截止阀(38-1)和回水管截止阀(38-2)均与控制器(28)的输出端连接；

步骤六中所述打开分水器蝶阀(4-2)、循环水泵(31)和集水器蝶阀(4-1)，分水器(25)向U型换热盘管(24)内通入流体，与采热充填体(23)进行热交换，热交换后的流体流入集水器(2)中的具体方法为：

步骤601、计算底层U型换热盘管(24)的效能，具体过程为：

步骤6011、控制器(28)控制分水器蝶阀(4-2)、集水器蝶阀(4-1)和循环水泵(31)打开，控制底层的供水管截止阀(38-1)、回水管截止阀(38-2)、电磁温度调节阀(42)和电磁流量调节阀(40)打开，并控制回水管三通阀(37-1)的支路侧和主路侧打开，控制底层向上各层的供水管三通阀(37-2)的主路侧和回水管三通阀(37-1)的主路侧打开，控制底层向上各层的供水管三通阀(37-2)的支路侧和回水管三通阀(37-1)的支路侧关闭，通过地埋管分水器(25)和分水支路(5)向换热盘管供水管(33)通入低温水，低温水只流入底层的U型换热盘管(24)内，与不断吸收深井围岩(19)热量的采热充填体(23)进行换热；

步骤6012、定义底层的U型换热盘管(24)为第0层，底层的U型换热盘管入口温度传感器(30)对流体在底层的U型换热盘管(24)入口处的温度$t_{in-0}$进行实时检测，并将检测到的信号实时传输给控制器(28)，底层的U型换热盘管出口温度传感器(39)对流体在底层的U型换热盘管(24)出口处的温度$t_{out-0}$进行实时检测，并将检测到的信号实时传输给控制器(28)，底层胶结充填体温度传感器(27)对底层的采热充填体(23)的温度$t_{backfill-0}$进行实时检测，

并将检测到的信号实时传输给控制器(28)，控制器(28)根据公式$\varepsilon_0=\frac{t_{out\text{-}0}-t_{in\text{-}0}}{t_{backfill\text{-}0}-t_{in\text{-}0}}$计算得到底层U型换热盘管(24)的效能$\varepsilon_0$；

步骤602、控制器(28)控制底层向上第k层的供水管三通阀(37-2)支路侧、回水管三通阀(37-1)支路侧、电磁温度调节阀(42)和电磁流量调节阀(40)打开，低温水进入底层向上第k层的U型换热盘管(24)内，与不断吸收深井围岩(19)热量的采热充填体(23)进行换热；其中，k的取值为非0自然数；控制器(28)将底层的采热充填体(23)的温度定义为$(t_{backfill})_{max}$，单位为℃，并根据公式$t_{backfill\text{-}k}=(t_{backfill})_{max}-0.04xk$计算得到底层向上第k层的采热充填体(23)的温度$t_{backfill\text{-}k}$，并判断是否满足$t_{backfill\text{-}k}<t_{out\text{-}0}$，当满足$t_{backfill}<t_{out\text{-}0}$时，将该底层向上第k层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管(35)以供给低温热用户；否则，当不满足$t_{backfill\text{-}k}<t_{out\text{-}0}$时，执行步骤三；其中，x为采空区每层层高，单位为m；

步骤603、控制器(28)根据公式$e=\left|\frac{t_{out-0}-t_{out-k}}{t_{out-0}}\right|$计算温度误差e，并判断温度误差e是否满足e≤5%，当温度误差e满足e≤5%时，再根据公式$\varepsilon_k=\frac{t_{out\text{-}k}-t_{in\text{-}k}}{t_{backfill\text{-}k}-t_{in\text{-}k}}$计算得到第k层U型换热盘管(24)的效能$\varepsilon_k$，并判断是否满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$，当满足e≤5%且满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，打开底层向上第k层回水管三通阀(37-1)支路侧，将第k层换热流体汇入换热盘管回水管(35)中，k的取值加1，返回步骤二，或结束；当满足e≤5%但不满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，则将第k层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管(35)以供给低温热用户；当温度误差e不满足e≤5%时，执行步骤四；其中，$t_{in\text{-}k}$为第k层的U型换热盘管入口温度传感器(30)检测到的流体在第k层的U型换热盘管(24)入口处的温度，$t_{out\text{-}k}$为第k层的U型换热盘管出口温度传感器(39)检测到的U型换热盘管(24)出口处的温度；

步骤604、控制器(28)根据公式$\left|\frac{t_{out-0}-t'_{out-k}}{t_{out-0}}\right|=5\%$计算得到底层向上第k层U型换热盘管(24)出口理论温度$t'_{out\text{-}k}$，根据公式$\varepsilon'_k=\frac{t'_{out\text{-}k}-t_{in\text{-}k}}{t_{backfill\text{-}k}-t_{in\text{-}k}}$计算得到第k层U型换热盘管(24)的理论效能$\varepsilon'_k$，并判断是否满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$，当满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时，控制器(28)控制第k层的电磁温度调节阀(42)关闭，并将$t'_{out\text{-}k}$设定为底层向上第k层电磁温度调节阀(42)的开启值，计算底层向上第k层U型换热盘管(24)的换热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管(24)内流体的标准质量流量$m_k$，通过调节电磁流量调节阀(40)使U型换热盘管(24)流量为$m_k$，将此层的温度提高到$t'_{out\text{-}k}$，当第k层U型换热盘管(24)内流体温度达到第k层电磁温度调节阀(42)的开启值$t'_{out\text{-}k}$时，控制器(28)控制第k层的电磁温度调节阀(42)开启，高温流体通过底层向上第k层回水管三通阀(37-1)支路侧，汇入换热盘管回水管(35)中，返回步骤二，或结束；当不满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时，将此层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管(35)以供给低温热用户；

步骤605、当所有层数U型换热盘管(24)出口的热流体均汇入换热盘管回水管(35)后，集水器温度传感器(36)对进入地埋管集水器(2)内的流体温度进行实时检测并将检测到的

信号输出给控制器(28),控制器(28)将进入地埋管集水器(2)内的流体温度于预先设定的热用户所需水温进行比较,当低于热用户所需水温时,减小温度误差e的阈值,重复进行步骤一至步骤四,直到满足用户需求。

9.按照权利要求8所述的方法,其特征在于:步骤604中所述计算底层向上第k层U型换热盘管(24)换热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管(24)内流体标准质量流量$m_k$采用的计算公式为:

$$\begin{cases} Q_k = m_k c_k (t'_{out-k} - t_{in-k}) \\ t_{f-k} = \dfrac{Q_k}{l_k} \cdot \left[ \dfrac{10\left(-0.89129+0.368\lg F_o-0.05508\lg^2 F_o+3.596\times10^{-3}\lg^3 F_o\right)}{\lambda} + R \right] + t_{backfill-k} \\ t_{f-k} = \dfrac{t'_{out-k}+t_{in-k}}{2} \end{cases}$$

其中,$c_k$为底层向上第k层U型换热盘管(24)内流体的比热容,$l_k$为底层向上第k层U型换热盘管(24)的长度,$t_{f-k}$为底层向上第k层U型换热盘管(24)内流体的平均温度,$F_o$为傅里叶数且$F_o=\alpha\tau/r^2$,α为热扩散率,τ为特征时间,r为热传导发生处的特征长度,λ为采热充填体(24)的导热系数,R为采热充填体(23)的热阻。

10.按照权利要求8所述的方法,其特征在于:每条分水支路(5)上均设置有流量传感器(32)和压力表(34),所述流量传感器(32)和压力表(34)的输出端均与控制器(28)的输入端连接;步骤一至步骤五执行的过程中,所述流量传感器(32)对分水支路(5)中的供水流量进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器(28),压力表(34)对分水支路(5)中的供水压力进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器(28),控制器(28)将供水流量与预先设定的供水流量下限值进行比较,并将供水压力与预先设定的供水压力上限值进行比较,当供水流量小于供水流量下限值且供水压力大于供水压力上限值时,判断为供回水系统发生了阻塞,控制器(28)控制循环水泵(31)停止工作。

# 固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置及方法

## 技术领域

[0001] 本发明属于深部矿井开采技术领域，具体涉及一种固流耦合协同降温的 矿井地热开采利用装置及方法。

## 背景技术

[0002] 随着社会发展和资源需求日益增加，浅部煤炭资源逐渐减少甚至枯竭， 为保障资源安全、扩展经济社会发展空间，世界各国均已进入深部资源开采 阶段。然而，随着矿井开采深度增加，由深层地温所诱发的高温热害愈加严 重，已成为制约深层矿床资源安全高效开采的重要因素。现有统计资料表明， 德国平均采900m，平均地温41℃，最深达1712m，最高地温达60℃；英国平 均采深700m，平均地温35℃，最深达1200m，最高地温达50℃；前苏联的顿 巴斯矿区最深的煤矿达到1400m，千米平均地温为30℃～40℃/1000m，个别 甚至达到52℃/1000m。对于我国而言，已有140多对矿井出现不同程度的热 害问题，其中有45％的矿井采掘工作面风温超过30℃，是世界上热害矿井最 多的国家。研究指出，30-40℃高温的采掘工作面，其事故率是温度低于30℃ 时的3.6倍，矿山井下作业地点气温每超过标准(此标准选用26℃)1℃，劳 动生产率就会下降6-8％。同时高温高湿的恶劣工作环境不仅影响安全生产， 而且危害井下广大工人的身心健康。矿井热害已成为继瓦斯、火、水、矿压、 粉尘之后的第六大灾害。因此，解决深井热害问题，调节和改善深井作业热 环境已成为世界矿床安全高效开采领域中极为重要，也是亟待解决的环节。

[0003] 深井高温围岩是诱发井下热害的根本原因，但其内部所蕴含的丰富热量 却为地热能的开发利用提供了有利条件。深层地热资源作为一种可再生能源， 存储量丰富，可开发潜力巨大。做好这一方面工作，对缓解能源短缺、环境 及生态问题具有重要意义。在深井开采过程中合理利用地热，可为矿区提供 清洁、廉价的热能，降低矿区运营成本，提高矿业可持续性，实现资源高效 开采及绿色开采。另一方面，及时高效地提取出深井地热，可有效降低围岩 或充填体温度，在一定程度上为深井降温产生积极的促进作用。

[0004] 因此，探索实现对深部矿产开采过程中的固流耦合协同降温配合地热开 采的技术很有必要，现有技术中还缺乏这样的技术。

[0005] 另外，在实际应用中，U型管道常被用做冷热水循环系统，其能够有效 降低进、出水循环能耗，避免地下有害矿物质通过水循环腐蚀管道系统。通 过在U型管道循环系统中注入低温水后，不断地吸收深井胶结充填体的高温 热量，使得管道内水温上升得到高温水，最后通过水泵输送给热用户。数据 表明，在地下每下降100m，温度会增加4℃，这说明地层内存在一个明显的 温度梯度。因此，埋管深度越深的管段输出的热水温度越高，然而在回水过 程中，不同深度埋管中不同温度的热水一同汇入总回水管后必然会导致出水 温度的整体降低。从㶲分析的角度来讲，系统温度相对于环境温度越高，㶲越大，能量品质也就越高，能转换成所需能量效率也高；㶲越低，虽然会得 到能量，但能级太低，可利用价值有限。因此，不能直接将深层充填体换热 得到的高温水与浅层充填体换热得到的低温水进行混合，否则会造成热品质 降低。因此，必须要合理控制各分层埋管的出水温度，使其以较高

温度汇入 回水总管来供给热用户,从而有效避免高低温混合过程中能量浪费。而然，现有技术中还缺乏这样的技术方法。

## 发明内容

[0006] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术中的不足,提供一 种固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,其通过U型换热盘管和采 场空气处理与运输装置共同提供冷负荷,通过固流耦合协同降温作用,能够 达到很好的采场降温效果,营造一个舒适的井下热环境。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案是:一种固流耦合协同降 温的矿井地热开采利用装置,包括矿井地热开采利用装置和采场空气处理 与运输装置,所述矿井地热开采利用装置包括进行各分层充填时形成的多 层采热充填体,垂直铺设在采热充填体内的U型换热盘管和设置在地面上 的分集水系统,以及用于连接所述分集水系统与U型换热盘管的供回水系 统;所述分集水系统包括分水器和集水器,所述分水器上连接有多条分水 支路,每条分水支路上均设置有分水器蝶阀和循环水泵,所述集水器上连 接有多条集水支路,每条集水支路上均设置有集水器蝶阀和集水器温度传 感器;所述供回水系统包括设置在天井和竖井内的多条换热盘管供水管和 多条换热盘管回水管,所述换热盘管供水管与分水支路连接,所述换热盘 管回水管与集水支路连接;

[0008] 所述采场层空气处理与运输装置包括地面冷水处理装置、空气处理机 组和用于为矿井回采空间内送入新鲜空气的送风管;所述地面冷水处理装 置包括冷水机组、冷却塔、冷却塔水箱和用于为空气处理机组换热提供所 需冷水的冷水蓄水箱,所述冷水机组的冷却水进水口通过第一低温冷却水 输送管和设置在第一低温冷却水输送管上的低温冷却水管流体输送动力 泵与冷却塔水箱的出水口连接,所述冷水机组的冷却水出水口通过高温冷 却水输送管与冷却塔的进水口连接,所述冷却塔水箱的进水口通过第二低 温冷却水输送管与冷却塔的出水口连接;所述冷水蓄水箱的侧面进水口通 过冷水输送管与冷水机组的冷冻水出水口连接,所述冷水蓄水箱的侧面出 水口通过冷冻水回水管和设置在冷冻水回水管上的冷冻水回水管流体输 送动力泵与冷水机组的冷冻水进水口连接;所述空气处理机组包括从进风 口到出风口的方向依次设置的一级空气过滤器、二级空气过滤器、表冷器 和送风机,所述表冷器的进水口通过低温冷冻水管与冷水蓄水箱的下出水 口连接,所述表冷器的出水口通过高温冷冻水管和设置在高温冷冻水管上 的高温冷冻水管流体输送动力泵与冷水蓄水箱的下进水口连接,所述送风 管的一端与空气处理机组的出风口连接,所述送风管的另一端通过天井、竖井通入井下并伸入各个矿井回采空间内。

[0009] 上述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置,还包括数据测量 监控装置,所述数据测量监控装置包括监控立杆、测量仪组、数据采集器 和计算机,所述监控立杆的数量为多根且均匀布设在矿井回采空间内,所 述测量仪组包括用于测量矿井回采空间内空气干球温度和相对湿度的的 温湿度测量仪、用于测量矿井回采空间内热辐射强度的黑球温度计、用于 测量矿井回采空间内空气流速的风速测量仪和用于测量回采空间内有害物浓度的有害物浓度测量仪,每根监控立杆上均布设有温湿度测量仪、黑 球温度计、风速测量仪和有害物浓度测量仪,所述温湿度测量仪的输出端、黑球温度计的输出端、风速测量仪的输出端和有害物浓度测量仪的输出端 均与数据采集器的输入端连接,所述数据采

集器与计算机相接。

[0010] 上述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，还包括换热盘管 出口温度优化系统，所述换热盘管出口温度优化系统包括与计算机相接的 控制器，设置在底层的采热充填体内且用于对底层的采热充填体的温度进 行实时检测的底层胶结充填体温度传感器，设置在各层U型换热盘管入口 处且用于对U型换热盘管入口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管 入口温度传感器和用于对U型换热盘管内的流量进行调节的电磁流量调节 阀，以及设置在各层U型换热盘管出口处的且用于对U型换热盘管出口处 流体的温度进行实时检测的U型换热盘管出口温度传感器和用于对U型换 热盘管内的温度进行调节的电磁温度调节阀；每层所述U型换热盘管的入 口均通过供水管三通阀与换热盘管供水管连接，每层所述U型换热盘管的 出口均通过回水管三通阀与换热盘管回水管连接；位于底层的U型换热盘 管的入口处设置有供水管截止阀，位于底层的U型换热盘管的出口处设置 有回水管截止阀；所述集水器温度传感器、底层胶结充填体温度传感器、U型换热盘管入口温度传感器和U型换热盘管出口温度传感器均与控制器 的输入端连接，所述分水器蝶阀、集水器蝶阀、循环水泵、电磁流量调节 阀、电磁温度调节阀、供水管三通阀、回水管三通阀、供水管截止阀和回 水管截止阀均与控制器的输出端连接。

[0011] 上述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，每条分水支路上 均设置有流量传感器和压力表，所述流量传感器和压力表的输出端均与控 制器的输入端连接。

[0012] 上述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，垂直铺设在采热 充填体内的U型换热盘管在竖直方向上呈蛇形布设。

[0013] 上述的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，所述采热充填体 包括分层交替设置的蓄热充填材料，以及设置在顶部的硬化顶和设置在蓄 热充填材料中的溜井。

[0014] 本发明还提供了一种通过采用将底层换热管段的效能与温度误差作 为各层U型换热盘管出口流体混合标准的方法，优化了出口流体温度，使 各层U型换热盘管的流体温度近似相等，提高了地下换热系统的㶲值，同 时通过联合控制，能够满足不同热用户的热水温度要求，能够广泛用于深 井下地埋管换热系统的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法，该方 法包括以下步骤：

[0015] 步骤一、在地面上设置数据采集器和与数据采集器相接的计算机，并 进行采场空气处理与运输装置的施工；

[0016] 步骤二、根据充填开采工艺进行矿块的采准、切割，形成天井、竖井 和矿井回采空间；

[0017] 步骤三、将步骤一中施工的送风管布置到矿井回采空间内；

[0018] 步骤四、在矿井回采空间内均匀布设多根监控立杆，在每根监控立杆 上均布设用于测量矿井回采空间内空气干球温度和相对湿度的的温湿度 测量仪、用于测量矿井回采空间内热辐射强度的黑球温度计、用于测量矿 井回采空间内空气流速的风速测量仪和用于测量回采空间内有害物浓度 的有害物浓度测量仪，并将温湿度测量仪、热辐射强度的黑球温度计、风 速测量仪和有害物浓度测量仪的输出端通过数据线与数据采集器的输入 端连接；

[0019] 步骤五、分层进行回采和充填，形成多层采热充填体，且在进行各层 充填时，输入蓄热充填材料进行充填的过程中，充填至需要设置U型换热 盘管的高度后，在蓄热充填材

料上铺设作业平板，铺设U型换热盘管，U 型换热盘管铺设完成后撤掉作业平板，并将U型换热盘管的入口与换热盘 管供水管连接，将U型换热盘管的出口与换热盘管回水管连接；

[0020] 步骤六、打开分水器蝶阀、循环水泵和集水器蝶阀，分水器向U型换 热盘管内通入流体，与采热充填体进行热交换，热交换后的流体流入集水 器中。

[0021] 上述的方法，所述固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置还包括 换热盘管出口温度优化系统，所述换热盘管出口温度优化系统包括与计算 机相接的控制器，设置在底层的采热充填体内且用于对底层的采热充填体 的温度进行实时检测的底层胶结充填体温度传感器，设置在各层U型换热 盘管入口处且用于对U型换热盘管入口处流体的温度进行实时检测的U型 换热盘管入口温度传感器和用于对U型换热盘管内的流量进行调节的电磁 流量调节阀，以及设置在各层U型换热盘管出口处的且用于对U型换热盘 管出口处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管出口温度传感器和用于 对U型换热盘管内的温度进行调节的电磁温度调节阀；每层所述U型换热 盘管的入口均通过供水管三通阀与换热盘管供水管连接，每层所述U型换 热盘管的出口均通过回水管三通阀与换热盘管回水管连接；位于底层的U 型换热盘管的入口处设置有供水管截止阀，位于底层的U型换热盘管的出 口处设置有回水管截止阀；所述集水器温度传感器、底层胶结充填体温度 传感器、U型换热盘管入口温度传感器和U型换热盘管出口温度传感器均 与控制器的输入端连接，所述分水器蝶阀、集水器蝶阀、循环水泵、电磁 流量调节阀、电磁温度调节阀、供水管三通阀、回水管三通阀、供水管截 止阀和回水管截止阀均与控制器的输出端连接；

[0022] 步骤六中所述打开分水器蝶阀、循环水泵和集水器蝶阀，分水器向U 型换热盘管内通入流体，与采热充填体进行热交换，热交换后的流体流入 集水器中的具体方法为：

[0023] 步骤601、计算底层U型换热盘管的效能，具体过程为：

[0024] 步骤6011、控制器控制分水器蝶阀、集水器蝶阀和循环水泵打开，控 制底层的供水管截止阀、回水管截止阀、电磁温度调节阀和电磁流量调节 阀打开，并控制回水管三通阀的支路侧和主路侧打开，控制底层向上各层 的供水管三通阀的主路侧和回水管三通阀的主路侧打开，控制底层向上各 层的供水管三通阀的支路侧和回水管三通阀的支路侧关闭，通过地埋管分 水器和分水支路向换热盘管供水管通入低温水，低温水只流入底层的U型 换热盘管内，与不断吸收深井围岩热量的采热充填体进行换热；

[0025] 步骤6012、定义底层的U型换热盘管为第0层，底层的U型换热盘管 入口温度传感器对流体在底层的U型换热盘管入口处的温度$t_{in-0}$进行实时 检测，并将检测到的信号实时传输给控制器，底层的U型换热盘管出口温 度传感器对流体在底层的U型换热盘管出口处的温度$t_{out-0}$进行实时检测，并将检测到的信号实时传输给控制器，底层胶结充填体温度传感器对底层 的采热充填体的温度$t_{backfill-0}$进行实时检测，并将检测到的信号实时传输给控制器，控制器根据公式$\varepsilon_0=\frac{t_{out-0}-t_{in-0}}{t_{backfill-0}-t_{in-0}}$计算得到底层U型换热盘管的效能 $\varepsilon_0$；

[0026] 步骤602、控制器控制底层向上第k层的供水管三通阀支路侧、回水 管三通阀支路侧、电磁温度调节阀和电磁流量调节阀打开，低温水进入底 层向上第k层的U型换热盘管内，与不断吸收深井围岩热量的采热充填体 进行换热；其中，k的取值为非0自然数；控制器将底层的采热充填体的 温度定义为$(t_{backfill})_{max}$，单位为℃，并根据公式$t_{backfill-k}=(t_{backfill})_{max}-0.04xk$计算得 到底层向上第k层的采热充填体的温度$t_{backfill-k}$，并判断是否

满足$t_{backfill-k}<t_{out-0}$，当满足$t_{backfill-k}<t_{out-0}$时，将该底层向上第k层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管以供给低温热用户；否则，当不满足$t_{backfill-k}<t_{out-0}$时，执行步骤三；其中，x为采空区每层层高，单位为m；

[0027] 步骤603、控制器根据公式$e=\left|\frac{t_{out-0}-t_{out-k}}{t_{out-0}}\right|$计算温度误差e，并判断温度误差e是否满足e≤5％，当温度误差e满足e≤5％时，再根据公式$\varepsilon_k=\frac{t_{out-k}-t_{in-k}}{t_{backfill-k}-t_{in-k}}$计算得到第k层U型换热盘管的效能$\varepsilon_k$，并判断是否满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$，当满足e≤5％且满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，打开底层向上第k层回水管三通阀支路侧，将第k层换热流体汇入换热盘管回水管中，k的取值加1，返回步骤二，或结束；当满足e≤5％但不满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，则将第k层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管以供给低温热用户；当温度误差e不满足e≤5％时，执行步骤四；其中，$t_{in-k}$为第k层的U型换热盘管入口温度传感器检测到的流体在第k层的U型换热盘管入口处的温度，$t_{out-k}$为第k层的U型换热盘管出口温度传感器检测到的U型换热盘管出口处的温度；

[0028] 步骤604、控制器根据公式$\left|\frac{t_{out-0}-t'_{out-k}}{t_{out-0}}\right|=5\%$计算得到底层向上第k层U型换热盘管出口理论温度$t'_{out-k}$，根据公式$\varepsilon'_k=\frac{t'_{out-k}-t_{in-k}}{t_{backfill-k}-t_{in-k}}$计算得到第k层U型换热盘管的理论效能$\varepsilon'_k$，并判断是否满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$，当满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时，控制器控制第k层的电磁温度调节阀关闭，并将$t'_{out-k}$设定为底层向上第k层电磁温度调节阀的开启值，计算底层向上第k层U型换热盘管的换热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管内流体的标准质量流量$m_k$，通过调节电磁流量调节阀使U型换热盘管流量为$m_k$，将此层的温度提高到$t'_{out-k}$，当第k层U型换热盘管内流体温度达到第k层电磁温度调节阀的开启值$t'_{out-k}$时，控制器控制第k层的电磁温度调节阀开启，高温流体通过底层向上第k层回水管三通阀支路侧，汇入换热盘管回水管中，返回步骤二，或结束；当不满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时，将此层作为新的底层，返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管以供给低温热用户；

[0029] 步骤605、当所有层数U型换热盘管出口的热流体均汇入换热盘管回水管后，集水器温度传感器对进入地埋管集水器内的流体温度进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器，控制器将进入地埋管集水器内的流体温度于预先设定的热用户所需水温进行比较，当低于热用户所需水温时，减小温度误差e的阈值，重复进行步骤一至步骤四，直到满足用户需求。

[0030] 上述的方法，步骤604中所述计算底层向上第k层U型换热盘管换热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管内流体标准质量流量$m_k$采用的计算公式为：

[0031]
$$\begin{cases} Q_k = m_k c_k (t'_{out-k} - t_{in-k}) \\ t_{f-k} = \dfrac{Q_k}{l_k} \cdot \left[ \dfrac{10\left(-0.89129+0.368\lg F_o-0.05508\lg^2 F_o+3.596\times 10^{-3}\lg^3 F_o\right)}{\lambda} + R \right] + t_{backfill-k} \\ t_{f-k} = \dfrac{t'_{out-k}+t_{in-k}}{2} \end{cases}$$

其中，$c_k$为底层向上第k层U型换热盘管内流体的比热容，$l_k$为底层向上第k层U 型换热盘管的长度，$t_{f-k}$为底层向上第k层U型换热盘管内流体的平均温度，$F_o$为傅里叶数且$F_o=\alpha\tau/r^2$，α为热扩散率，τ为特征时间，r为热传导发生 处的特征长度，λ为采热充填体的导热系数，R为采热充填体的热阻。

[0032] 上述的方法，每条分水支路上均设置有流量传感器和压力表，所述流 量传感器和压力表的输出端均与控制器的输入端连接；步骤一至步骤五执 行的过程中，所述流量传感器对分水支路中的供水流量进行实时检测并将 检测到的信号输出给控制器，压力表对分水支路中的供水压力进行实时检 测并将检测到的信号输出给控制器，控制器将供水流量与预先设定的供水 流量下限值进行比较，并将供水压力与预先设定的供水压力上限值进行比 较，当供水流量小于供水流量下限值且供水压力大于供水压力上限值时， 判断为供回水系统发生了阻塞，控制器控制循环水泵停止工作。

[0033] 本发明与现有技术相比具有以下优点：

[0034] 1、本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，在实现了采 场降温的同时，还能够实现地热开采，设计新颖合理，功能完备，且实现方 便。

[0035] 2、本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，数据测量监 控装置布线简单，能够准确实时地对矿井空气进行监控，为井下营造良好的 热环境提供了依据。

[0036] 3、本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法，没有通过风 流单独进行降温冷却，而是考虑了深层地埋管换热管对井下热环境产生的协 同降温效应；通过U型换热盘管和采场空气处理与运输装置共同提供冷负荷， 通过固流耦合协同降温作用，能够达到很好的采场降温效果，营造一个舒适 的井下热环境。

[0037] 4、本发明中的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法，通过采用 将底层换热管段的效能与温度误差作为各层U型换热盘管出口流体混合标 准的方法，优化了出口流体温度，使各层U型换热盘管的流体温度近似相 等，提高了地下换热系统的㶲值，同时通过联合控制，能够满足不同热用 户的热水温度要求，能够广泛用于深井下地埋管换热系统。

[0038] 5、本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法，方法步骤简 单，设计新颖合理，实现方便，降温效果好，地热开采利用效果好。

[0039] 6、将本发明应用在地热开采利用系统中，能够为矿山带来额外的能量及 经济来源，并且可以延续矿山的生命周期，本发明的实用性强，推广应用价 值高。

[0040] 下面通过附图和实施例，对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

## 附图说明

[0041] 图1为本发明固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置的结构示意 图。

[0042] 图2为本发明空气处理机组的结构示意图。

[0043] 图3为本发明测量仪组在监控立杆上的布设示意图。

[0044] 图4为本发明采热充填体的结构示意图。

[0045] 图5为本发明数据测量监控装置与换热盘管出口温度优化系统的连接 关系示意图。

[0046] 图6为本发明U型换热盘管热交换后的流体流入集水器中的方法流程 框图。

[0047] 附图标记说明:

[0048] 1—计算机； 2—地埋管集水器； 3—集水支路；

[0049] 4-1—集水器蝶阀； 4-2—分水器蝶阀； 5—分水支路；

[0050] 6—冷水蓄水箱； 7—冷水输送管； 8—高温冷却水管；

[0051] 9—冷却塔； 10—冷却塔水箱； 11—1—第一低温冷却水输送管；

[0052] 11-2—第二低温冷却水输送管； 12-1—低温冷却水管流体输送动力泵；

[0053] 12-2—冷冻水回水管流体输送动力泵；

[0054] 12-3—高温冷冻水管流体输送动力泵；

[0055] 13—冷水机组； 14-冷冻水回水管； 15-低温冷冻水管；

[0056] 16—高温冷冻水管； 17—空气处理机组； 17-1—一级空气过滤器；

[0057] 17-2—二级空气过滤器；17-3—表冷器； 17-4—送风机；

[0058] 18—送风管； 19—深井围岩； 20—矿井回采空间；

[0059] 21—监控立杆； 22-1—温湿度测量仪； 22-2—黑球温度计；

[0060] 22-3—风速测量仪； 22-4—有害物浓度测量仪；

[0061] 23—采热充填体； 23-1—蓄热充填材料； 23-2—溜井；

[0062] 23-3—硬化顶； 24—U型换热盘管； 25—分水器；

[0063] 26—数据采集器； 27—底层胶结充填体温度传感器；

[0064] 28—控制器； 30—U型换热盘管入口温度传感器；

[0065] 31—循环水泵； 32—流量传感器； 33—供水管；

[0066] 34—压力表； 35—回水管； 36—集水器温度传感器；

[0067] 37-1—回水管三通阀； 37-2—供水管三通阀；38-1—供水管截止阀；

[0068] 38-2—回水管截止阀； 39—U型换热盘管出口温度传感器；

[0069] 40—电磁流量调节阀； 42—电磁温度调节阀。

## 具体实施方式

[0070] 如图1所示,本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置，包括矿井地热开采利用装置和采场空气处理与运输装置,所述矿井地热开 采利用装置包括进行各分层充填时形成的多层采热充填体23,垂直铺设在 采热充填体23内的U型换热盘管24和设置在地面上的分集水系统,以及 用于连接所述分集水系统与U型换热盘管24的供回水系统;所述分集水 系统包括分水器25和集水器2,所述分水器25上连接有多条分水支路5，每条分水支路5上均设置有分水器蝶阀4-2和循环水泵31,所述集水器2 上连接有多条集水支路3,每条集水支路3上均设置有集水器蝶阀4-1和 集水器温度传感器36;所述供回水系统包括设置在天井和竖井内的多条换 热盘管供水管33和多条换热盘管回水管35,所述换热盘

管供水管33与分 水支路5连接，所述换热盘管回水管35与集水支路3连接；

[0071] 所述采场层空气处理与运输装置包括地面冷水处理装置、空气处理机 组17和用于为矿井回采空间20内送入新鲜空气的送风管18；所述地面冷 水处理装置包括冷水机组13、冷却塔9、冷却塔水箱10和用于为空气处 理机组17具体是空气处理机组17中的表冷器17-3换热提供所需冷水的 冷水蓄水箱6，所述冷水机组13的冷却水进水口通过第一低温冷却水输送 管11-1和设置在第一低温冷却水输送管11-1上的低温冷却水管流体输送 动力泵12-1与冷却塔水箱10的出水口连接，所述冷水机组13的冷却水 出水口通过高温冷却水输送管8与冷却塔9的进水口连接，所述冷却塔水 箱10的进水口通过第二低温冷却水输送管11-2与冷却塔9的出水口连接； 所述冷水蓄水箱6的侧面进水口通过冷水输送管7与冷水机组13的冷冻 水出水口连接，所述冷水蓄水箱6的侧面出水口通过冷冻水回水管14和 设置在冷冻水回水管14上的冷冻水回水管流体输送动力泵12-2与冷水机 组13的冷冻水进水口连接；结合图2，所述空气处理机组17包括从进风 口到出风口的方向依次设置的一级空气过滤器17-1、二级空气过滤器17-2、表冷器17-3和送风机17-4，所述表冷器17-3的进水口通过低温冷 冻水管15与冷水蓄水箱6的下出水口连接，所述表冷器17-3的出水口通 过高温冷冻水管16和设置在高温冷冻水管16上的高温冷冻水管流体输送 动力泵12-3与冷水蓄水箱6的下进水口连接，所述送风管18的一端与空 气处理机组17的出风口连接，所述送风管18的另一端通过天井、竖井通 入井下并伸入各个矿井回采空间20内。

[0072] 具体实施时，送风管18在阶段运输巷内横向布置，通过送风气流来 提供一部分冷负荷。所述U型换热盘管24和采场空气处理与运输装置共 同提供冷负荷，通过固流耦合协同降温作用，能够达到很好的采场降温效 果，营造一个舒适的井下热环境。再通过供回水系统和分集水系统，能够 实现高效的地热开采利用效果。所述冷却塔水箱10能够方便地增加系统 间歇运行时所需的存水容积，使低温冷却水管流体输送动力泵12-1能够 稳定可靠地工作。

[0073] 本实施例中，本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置还 包括数据测量监控装置，结合图3，所述数据测量监控装置包括监控立杆 21、测量仪组、数据采集器26和计算机1，所述监控立杆21的数量为多 根且均匀布设在矿井回采空间20内，所述测量仪组包括用于测量矿井回 采空间20内空气干球温度和相对湿度的的温湿度测量仪22-1、用于测量 矿井回采空间20内热辐射强度的黑球温度计22-2、用于测量矿井回采空 间20内空气流速的风速测量仪22-3和用于测量回采空间20内有害物浓 度的有害物浓度测量仪22-4，每根监控立杆21上均布设有温湿度测量仪 22-1、黑球温度计22-2、风速测量仪22-3和有害物浓度测量仪22-4，所 述温湿度测量仪22-1的输出端、黑球温度计22-2的输出端、风速测量仪 22-3的输出端和有害物浓度测量仪22-4的输出端均与数据采集器26的输 入端连接，所述数据采集器26与计算机1相接。

[0074] 具体实施时，如图3所示，每根监控立杆21上均布设有三个温湿度 测量仪22-1、一个黑球温度计22-2、四个风速测量仪22-3和两个有害物 浓度测量仪22-4，温湿度测量仪22-1、黑球温度计22-2、风速测量仪22-3 和有害物浓度测量仪22-4的安装位置与其四周深井围岩19的距离均不小 于0.5m，且安装位置避开通风道和通风口；由于在矿井回采空间20内，矿工主要站着作业，因此温湿度测量仪22-1和风速测量仪22-3的安装高 度应该在距离地面0.1m人的脚踝、1.1m人的腹部和1.7m人的头部处选取，即三个温湿度测量仪22-1和

三个风速测量仪22-3分别安装在监控立杆21 上距离地面0.1m、1.1m和1.7m高度处，另一个风速测量仪22-3安装在 监控立杆21上距离地面2.2m高度处；两个有害物浓度测量仪22-4分别 安装在监控立杆21上距离地面0.8m和1.7m高度处；黑球温度计22-2安 装在监控立杆21上距离地面1.7m高度处。温湿度测量仪22-1、黑球温度 计22-2、风速测量仪22-3和有害物浓度测量仪22-4测量的数据通过数据 采集器26采集后传输给计算机1，实现了实时、远程、自动测量矿井回采 空间20内空气干球温度和相对湿度、热辐射强度、空气流速、有害物浓 度的功能。通过设置温湿度测量仪22-1、黑球温度计22-2、风速测量仪 22-3和有害物浓度测量仪22-4，能够有效测量矿井回采空间20内的围岩 散热、设备散热量、照明、人体放热、辐射温度、工作面的相对湿度、爆 破作业产生的粉尘等引起的环境中空气干球温度、相对湿度、热辐射强度、 空气流速、有害物浓度的变化，有效监控矿井空气品质及热环境，为计算 有效温度、等效温度、黑球温度、WBGT指数、热应力指数HIS、预测平均 热感觉指数PMV和热环境预测不满意百分比PPD等做好了准备，并为改善 矿井环境提供了依据。

[0075] 具体实施时，根据ISO7730，PMV推荐值在-0.5～0.5，PPD推荐值为 ≤10％，在-3≤PMV<-1及+1<PMV≤+3时，可认为井下工作环境舒适性较差；当矿井回采空间20内的空气质量低于要求标准时，可以采用加大新风量 或在矿井回采空间20内布置空气净化器的方式改善空气质量，当矿井回 采空间20内热辐射强度高于要求标准时，可以采用加大地下埋管冷量的 方式或采用更低温的冷水进行换热。

[0076] 本实施例中，本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用装置还 包括换热盘管出口温度优化系统，所述换热盘管出口温度优化系统包括与 计算机1相接的控制器28，设置在底层的采热充填体23内且用于对底层 的采热充填体23的温度进行实时检测的底层胶结充填体温度传感器27， 设置在各层U型换热盘管24入口处且用于对U型换热盘管24入口处流体 的温度进行实时检测的U型换热盘管入口温度传感器30和用于对U型换 热盘管24内的流量进行调节的电磁流量调节阀40，以及设置在各层U型 换热盘管24出口处的且用于对U型换热盘管24出口处流体的温度进行实 时检测的U型换热盘管出口温度传感器39和用于对U型换热盘管24内的 温度进行调节的电磁温度调节阀42；每层所述U型换热盘管24的入口均 通过供水管三通阀37-2与换热盘管供水管33连接，从而使U型换热盘管 24的入口通过换热盘管供水管33连接于地埋管分水器25，每层所述U型 换热盘管24的出口均通过回水管三通阀37-1与换热盘管回水管35连接， 从而使U型换热盘管24的出口通过换热盘管回水管35连接于地埋管集水 器2；位于底层的U型换热盘管24的入口处设置有供水管截止阀38-1， 位于底层的U型换热盘管24的出口处设置有回水管截止阀38-2；所述集 水器温度传感器36、底层胶结充填体温度传感器27、U型换热盘管入口温 度传感器30和U型换热盘管出口温度传感器39均与控制器28的输入端 连接，所述分水器蝶阀4-2、集水器蝶阀4-1、循环水泵31、电磁流量调 节阀40、电磁温度调节阀42、供水管三通阀37-2、回水管三通阀37-1、 供水管截止阀38-1和回水管截止阀38-2均与控制器28的输出端连接。

[0077] 具体实施时，所述分水器蝶阀4-2用来控制换热盘管供水管33的开 启和关闭，所述循环水泵31用来为整个所述供回水系统提供动力；所述 集水器蝶阀4-1用来控制换热盘管回水管35的开启和关闭，所述集水器 温度传感器36用于对换热盘管回水管35的出水温度进行实时检测并将检 测到的信号输出给控制器28，控制器28将出水温度与预先设定的出水温 度阈值进行比对，来评价是否满足热用户需求，当不满足热用户需求时， 开启分水

支路5与集水支路3。

[0078] 本实施例中，每条分水支路5上均设置有流量传感器32和压力表34，所述流量传感器32和压力表34的输出端均与控制器28的输入端连接。

[0079] 具体实施时，所述流量传感器32和压力表34配合工作，当供回水系 统发生阻塞时，所述压力表34检测到的压力增加，且所述流量传感器32 检测到的流量减小，控制器28检测到该信号后，控制循环水泵31停止工 作，能够有效防止循环水泵31空转烧毁。

[0080] 本实施例中，垂直铺设在采热充填体23内的U型换热盘管24在竖直 方向上呈蛇形布设。这样的布设方式能够与地下垂直分布的温度场相平 行，更有利于地热开采。

[0081] 本实施例中，如图4所示，所述采热充填体23包括分层交替设置的 蓄热充填材料23-1，以及设置在顶部的硬化顶23-3和设置在蓄热充填材 料23-1中的溜井23-2。

[0082] 本发明的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用方法，包括以下步 骤：

[0083] 步骤一、在地面上设置数据采集器26和与数据采集器26相接的计算 机1，并进行采场空气处理与运输装置的施工；

[0084] 具体实施时，进行采场空气处理与运输装置的施工即在地面上设置空 气处理机组17和送风管18，以及地面冷水处理装置中的冷水机组13、冷 却塔9、冷却塔水箱10和冷水蓄水箱6，并按照各单元的连接关系进行连 接；

[0085] 步骤二、根据充填开采工艺进行矿块的采准、切割，形成天井、竖井 和矿井回采空间20；

[0086] 步骤三、将步骤一中施工的送风管18布置到矿井回采空间20内；

[0087] 步骤四、在矿井回采空间20内均匀布设多根监控立杆21，在每根监 控立杆21上均布设用于测量矿井回采空间20内空气干球温度和相对湿度 的的温湿度测量仪22-1、用于测量矿井回采空间20内热辐射强度的黑球 温度计22-2、用于测量矿井回采空间20内空气流速的风速测量仪22-3 和用于测量回采空间20内有害物浓度的有害物浓度测量仪22-4，并将温 湿度测量仪22-1、热辐射强度的黑球温度计22-2、风速测量仪22-3和有 害物浓度测量仪22-4的输出端通过数据线与数据采集器26的输入端连 接；

[0088] 步骤五、分层进行回采和充填，形成多层采热充填体23，且在进行各 层充填时，输入蓄热充填材料23-1进行充填的过程中，充填至需要设置U 型换热盘管24的高度后，在蓄热充填材料23-1上铺设作业平板，铺设U 型换热盘管24，U型换热盘管24铺设完成后撤掉作业平板，并将U型换 热盘管24的入口与换热盘管供水管33连接，将U型换热盘管24的出口与换热盘管回水管35连接；

[0089] 步骤六、打开分水器蝶阀4-2、循环水泵31和集水器蝶阀4-1，分水 器25向U型换热盘管24内通入流体，与采热充填体23进行热交换，热 交换后的流体流入集水器2中。

[0090] 本实施例中，结合图5，所述固流耦合协同降温的矿井地热开采利用 装置还包括换热盘管出口温度优化系统，所述换热盘管出口温度优化系统 包括与计算机1相接的控制器28，设置在底层的采热充填体23内且用于 对底层的采热充填体23的温度进行实时检测的底层胶结充填体温度传感 器27，设置在各层U型换热盘管24入口处且用于对U型换热盘管24入口 处流体的温度进行实时检测的U型换热盘管入口温度传感器30和用于对U 型换热盘管24内的流量进行调节的电磁流量调节阀40，以及设置在各层 U型换热盘管24出口处的且用于对U型换热盘管24出口处流体的温度进 行实时检测的U型换热盘管出口温度传感

器39和用于对U型换热盘管24 内的温度进行调节的电磁温度调节阀42;每层所述U型换热盘管24的入 口均通过供水管三通阀37-2与换热盘管供水管33连接,每层所述U型换 热盘管24的出口均通过回水管三通阀37-1与换热盘管回水管35连接; 位于底层的U型换热盘管24的入口处设置有供水管截止阀38-1,位于底 层的U型换热盘管24的出口处设置有回水管截止阀38-2;所述集水器温 度传感器36、底层胶结充填体温度传感器27、U型换热盘管入口温度传感 器30和U型换热盘管出口温度传感器39均与控制器28的输入端连接, 所述分水器蝶阀4-2、集水器蝶阀4-1、循环水泵31、电磁流量调节阀40、 电磁温度调节阀42、供水管三通阀37-2、回水管三通阀37-1、供水管截 止阀38-1和回水管截止阀38-2均与控制器28的输出端连接;

[0091] 本实施例中,如图6所示,步骤六中所述打开分水器蝶阀4-2、循环 水泵31和集水器蝶阀4-1,分水器25向U型换热盘管24内通入流体,与 采热充填体23进行热交换,热交换后的流体流入集水器2中的具体方法 为:

[0092] 步骤601、计算底层U型换热盘管24的效能,具体过程为:

[0093] 步骤6011、控制器28控制分水器蝶阀4-2、集水器蝶阀4-1和循环 水泵31打开,控制底层的供水管截止阀38-1、回水管截止阀38-2、电磁 温度调节阀42和电磁流量调节阀40打开,并控制回水管三通阀37-1的 支路侧和主路侧打开,控制底层向上各层的供水管三通阀37-2的主路侧 和回水管三通阀37-1的主路侧打开,控制底层向上各层的供水管三通阀37-2的支路侧和回水管三通阀37-1的支路侧关闭,通过地埋管分水器25 和分水支路5向换热盘管供水管33通入低温水,低温水只流入底层的U 型换热盘管24内,与不断吸收深井围岩19热量的采热充填体23进行换 热;

[0094] 步骤6012、定义底层的U型换热盘管24为第0层,底层的U型换热 盘管入口温度传感器30对流体在底层的U型换热盘管24入口处的温度$t_{in-0}$进行实时检测,并将检测到的信号实时传输给控制器28,底层的U型换热 盘管出口温度传感器39对流体在底层的U型换热盘管24出口处的温度$t_{out-0}$进行实时检测,并将检测到的信号实时传输给控制器28,底层胶结充填体 温度传感器27对底层的采热充填体23的温度$t_{backfill-0}$进行实时检测,并将 检测到的信号实时传输给控制器28,控制器28根据公式$\varepsilon_0=\frac{t_{out-0}-t_{in-0}}{t_{backfill-0}-t_{in-0}}$计 算得到底层U型换热盘管24的效能$\varepsilon_0$;

[0095] 步骤602、控制器28控制底层向上第k层的供水管三通阀37-2支路 侧、回水管三通阀37-1支路侧、电磁温度调节阀42和电磁流量调节阀40 打开,低温水进入底层向上第k层的U型换热盘管24内,与不断吸收深井 围岩19热量的采热充填体23进行换热;其中,k的取值为非0自然数; 控制器28将底层的采热充填体23的温度定义为$(t_{backfill})_{max}$,单位为℃,并根据公式$t_{backfill-k}=(t_{backfill})_{max}-0.04xk$计算得到底层向上第k层的采热充填体23 的温度$t_{backfill}$,并判断是否满足$t_{backfill-k}<t_{out-0}$,当满足$t_{backfill}<t_{out-0}$时,将该底 层向上第k层作为新的底层,返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回 水管35以供给低温热用户;否则,当不满足$t_{backfill-k}<t_{out-0}$时,执行步骤三; 其中,x为采空区每层层高,单位为m;

[0096] 对于深层换热来说,每下降100m,温度会上升4℃,每下降1m,温度 会上升0.04℃,因此采用$t_{backfill\ k}=(t_{backfill})_{max}-0.04xk$就能够计算得到底层向上 第k层的采热充填体23的温

度$t_{backfill}$；

[0097] 步骤603、控制器28根据公式$e=\left|\frac{t_{out-0}-t_{out-k}}{t_{out-0}}\right|$计算温度误差e，并判断 温度误差e是否满足e≤5%，当温度误差e满足e≤5%时，再根据公式 $\varepsilon_k=\frac{t_{out-k}-t_{in-k}}{t_{backfill-k}-t_{in-k}}$计算得到第k层U型换热盘管24的效能$\varepsilon_k$，并判断是否满足 $\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$，当满足e≤5%且满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，打开底层向上第k层回水管三通阀 37-1支路侧，将第k层换热流体汇入换热盘管回水管35中，k的取值加1， 返回步骤二，或结束(当k的取值达到最大，即为最顶层U型换热盘管24 时，结束)；当满足e≤5%但不满足$\varepsilon_k\leq\varepsilon_0$时，则将第k层作为新的底层， 返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管35以供给低温热用户； 当温度误差e不满足e≤5%时，执行步骤四；其中，$t_{in-k}$为第k层的U型换热 盘管入口温度传感器30检测到的流体在第k层的U型换热盘管24入口处 的温度，$t_{out-k}$为第k层的U型换热盘管出口温度传感器39检测到的U型换 热盘管24出口处的温度；

[0098] 考虑到各层胶结充填体温度梯度、测量原件的误差以及底层换热效果 最为理想，允许每层U型换热盘管24出口温度与底层U型换热盘管24出 口温度间存在5%的误差，因此设置判断条件为e≤5%；

[0099] 步骤604、控制器28根据公式$\left|\frac{t_{out-0}-t'_{out-k}}{t_{out-0}}\right|=5\%$计算得到底层向上第k层 U型换热盘管24出口理论温度$t'_{out-k}$，根据公式$\varepsilon'_k=\frac{t'_{out-k}-t_{in-k}}{t_{backfill-k}-t_{in-k}}$计算得到第k层 U型换热盘管24的理论效能$\varepsilon'_k$，并判断是否满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$，当满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时， 控制器28控制第k层的电磁温度调节阀42关闭，并将$t'_{out-k}$设定为底层向 上第k层电磁温度调节阀42的开启值，计算底层向上第k层U型换热盘管 24的换热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管24内流体的标准质量流量$m_k$，通过调节电磁流量调节阀40使U型换热盘管24流量为$m_k$，将此层的 温度提高到$t'_{out-k}$，当第k层U型换热盘管24内流体温度达到第k层电磁温 度调节阀42的开启值$t'_{out-k}$时，控制器28控制第k层的电磁温度调节阀42 开启，高温流体通过底层向上第k层回水管三通阀37-1支路侧，汇入换热 盘管回水管35中，返回步骤二，或结束(当k的取值达到最大，即为最顶层U型换热盘管24时，结束)；当不满足$\varepsilon'_k\leq\varepsilon_0$时，将此层作为新的底层， 返回步骤一并使流体汇入低能级换热盘管回水管35以供给低温热用户；

[0100] 本实施例中，步骤604中所述计算底层向上第k层U型换热盘管24换 热量$Q_k$和底层向上第k层U型换热盘管24内流体标准质量流量$m_k$采用的 计算公式为：

[0101] $$\begin{cases} Q_k=m_k c_k(t'_{out-k}-t_{in-k}) \\ t_{f-k}=\frac{Q_k}{l_k}\cdot\left[\frac{10\left(-0.89129+0.368\lg F_o-0.05508\lg^2 F_o+3.596\times10^{-3}\lg^3 F_o\right)}{\lambda}+R\right]+t_{backfill-k} \\ t_{f-k}=\frac{t'_{out-k}+t_{in-k}}{2} \end{cases}$$

其中，$c_k$为底层向上第k层U型换热盘管24内流体的比热容，$l_k$为底层向上第k层U型换热盘管24的长度，$t_{f-k}$为底层向上第k层U型换热盘管24内流体的 平均温度，$F_o$为傅里叶数且$F_o=\alpha\tau/r^2$，α为热扩散率，τ为特征时间，r为 热传导发生处的特征长度，λ为采热充填体23的导热系数，R为采热充填 体23的热阻。

[0102] 其中，底层向上第k层U型换热盘管内流体平均温度$t_{f-k}$的计算公式是 根据柱热源理论得出的。

[0103] 步骤605、当所有层数U型换热盘管24出口的热流体均汇入换热盘管 回水管35后，集水器温度传感器36对进入地埋管集水器2内的流体温度 进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器28，控制器28将进入地埋 管集水器2内的流体温度于预先设定的热用户所需水温进行比较，当低于 热用户所需水温时，减小温度误差e的阈值(即减小为比5％小的数值)， 重复进行步骤一至步骤四，直到满足用户需求。

[0104] 以上步骤中，计算U型换热盘管24的效能，是假设流体物性参数在 整个传热过程中都是常量，传热系数在换热面上不变，换热面中沿管子轴 向的导热量忽略不计，采热充填体23与围岩23接触时间充分。

[0105] 本实施例中，每条分水支路5上均设置有流量传感器32和压力表34，所述流量传感器32和压力表34的输出端均与控制器28的输入端连接；步骤一至步骤五执行的过程中，所述流量传感器32对分水支路5中的供 水流量进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器28，压力表34对分 水支路5中的供水压力进行实时检测并将检测到的信号输出给控制器28，控制器28将供水流量与预先设定的供水流量下限值进行比较，并将供水 压力与预先设定的供水压力上限值进行比较，当供水流量小于供水流量下 限值且供水压力大于供水压力上限值时，判断为供回水系统发生了阻塞，控制器28控制循环水泵31停止工作。这样能够有效防止供回水系统发生 阻塞时循环水泵31空转烧毁。

[0106] 综上所述，本发明提供的固流耦合协同降温的矿井地热开采利用系统 及方法，一方面，以井下热舒适环境为着眼点，考虑了深井地埋换热管换 热将对井下岩体温度场分布产生重要作用，继而影响采场热环境特性及作 业人员热舒适性的问题，通过U型换热盘管24和采场空气处理与运输装 置共同提供冷负荷，通过固流耦合协同降温作用，能够达到很好的采场降 温效果，营造一个舒适的井下热环境；另一方面，通过采用将底层换热管 段的效能与温度误差作为各层U型换热盘管出口流体混合标准的方法，优 化了出口流体温度，使各层U型换热盘管的流体温度近似相等，提高了地 下换热系统的焓值，同时通过联合控制，能够满足不同热用户的热水温度 要求，能够广泛用于深井下地埋管换热系统，本发明的实用性强，推广应 用价值高。

[0107] 以上所述，仅是本发明的较佳实施例，并非对本发明作任何限制，凡 是根据本发明技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、变更以及等效 结构变化，均仍属于本发明技术方案的保护范围内。

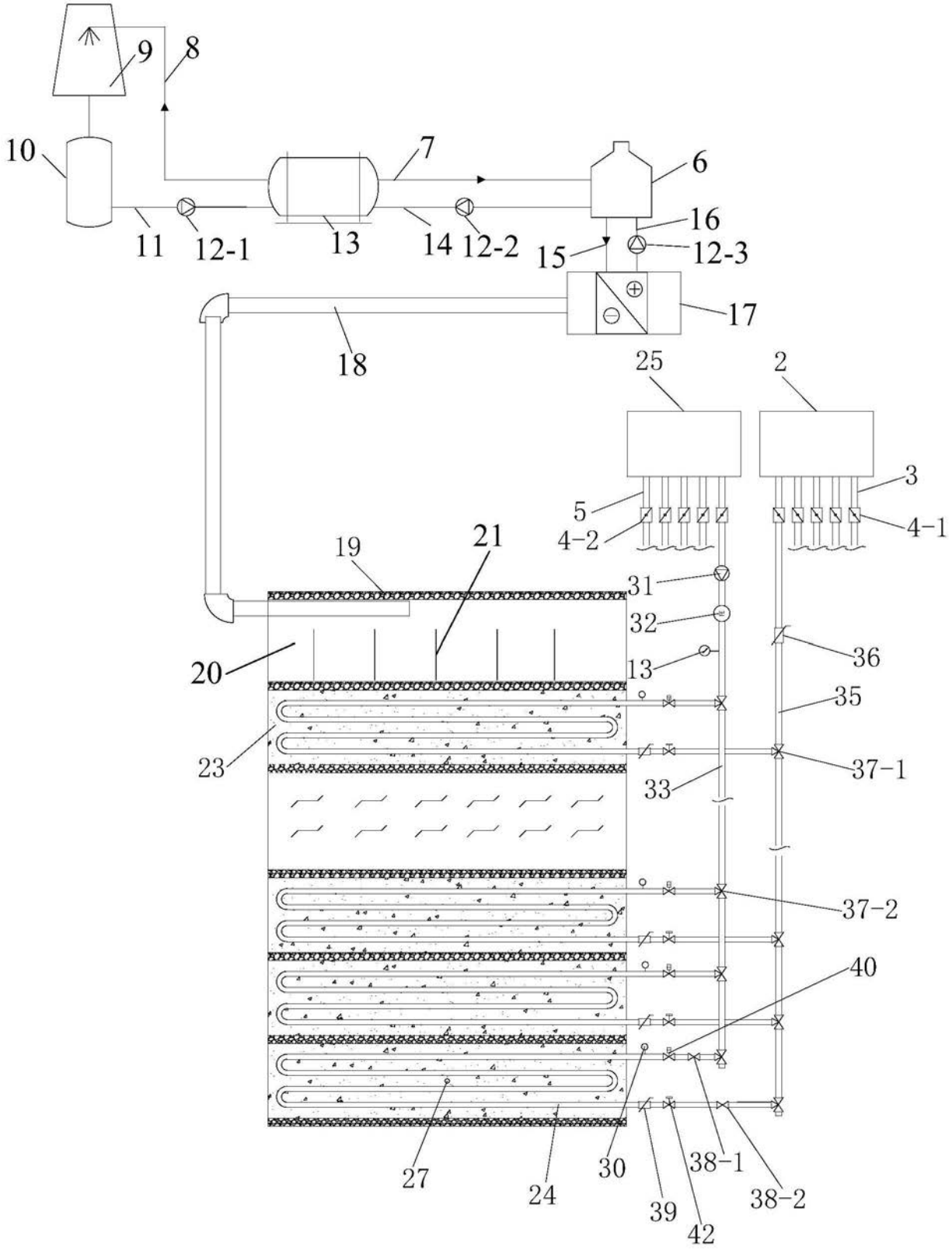

9
8
10
7
6
16
11
12-1
13
14
12-2
15
12-3
17
18
25
2
3
5
4-2
4-1
19
21
31
32
20
13
36
35
23
37-1
33
37-2
40
27
24
30
38-1
38-2
39
42

图1

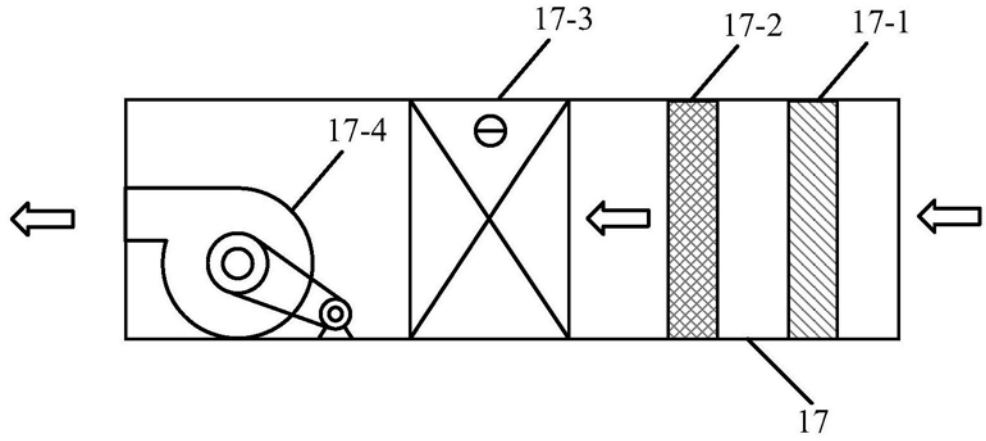



图2

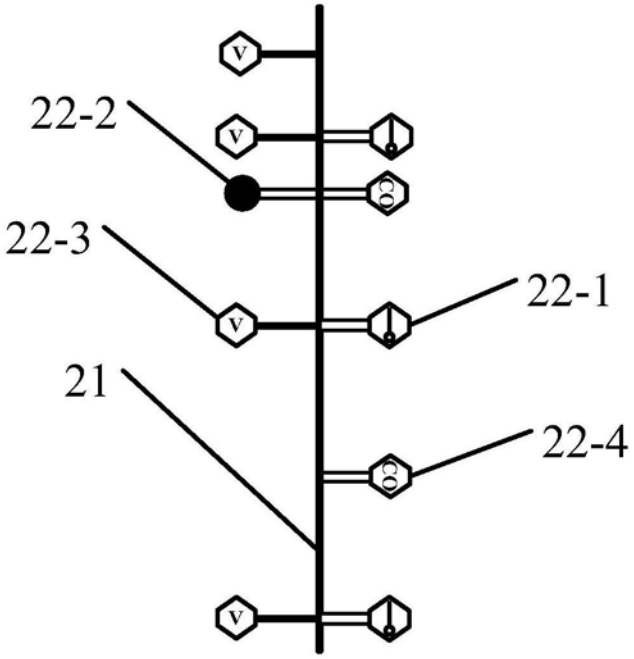



图3

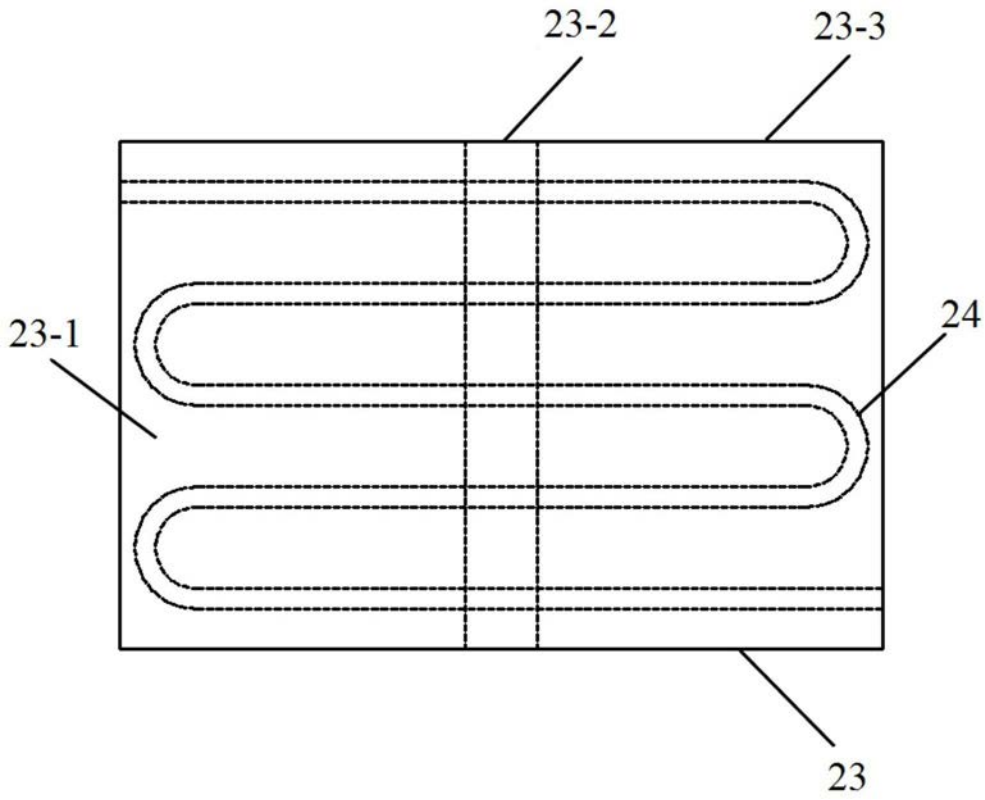



图4

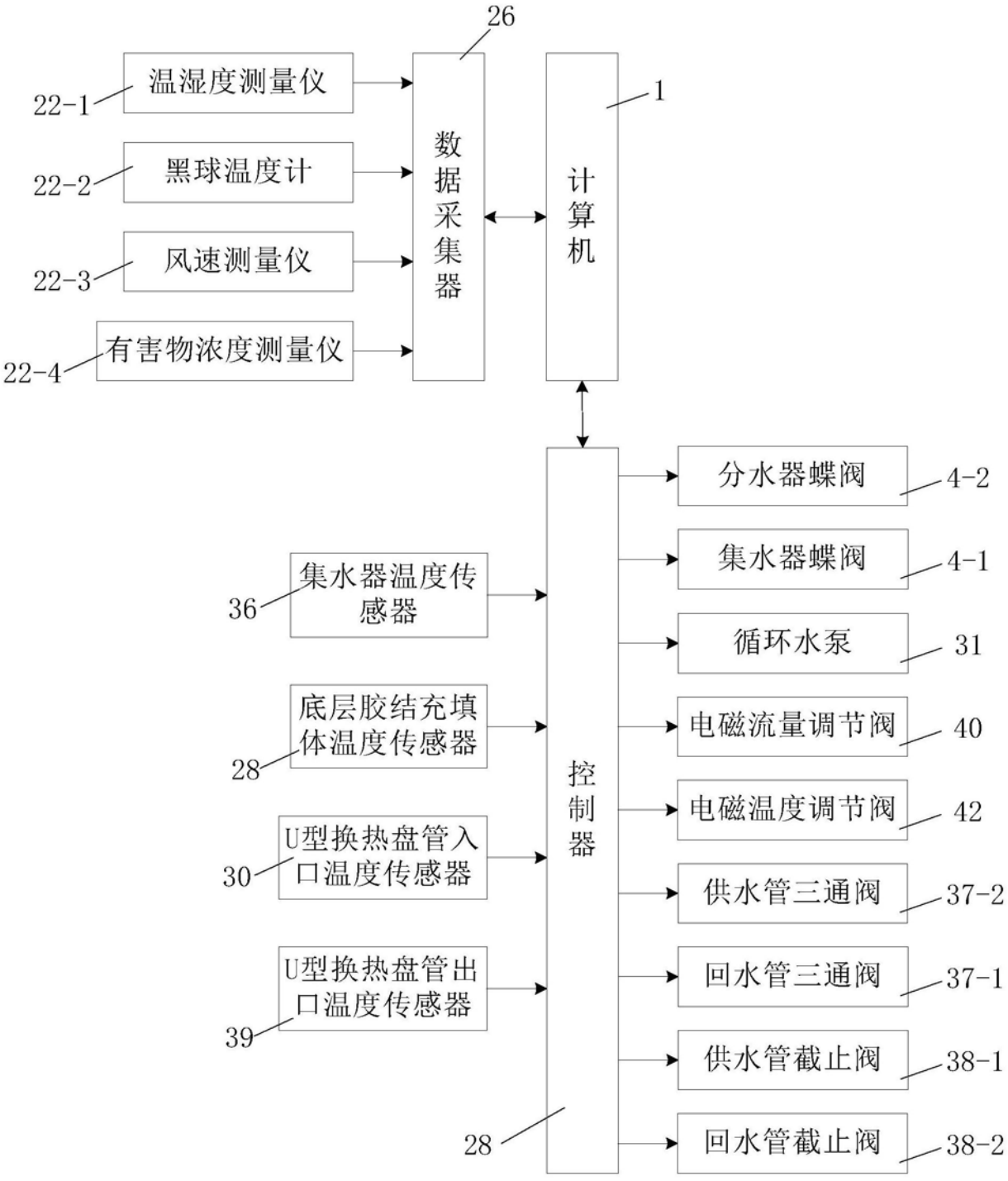

26
22-1
温湿度测量仪
22-2
黑球温度计
22-3
风速测量仪
22-4
有害物浓度测量仪
数据采集器
计算机
1
控制器
28
分水器蝶阀
4-2
集水器蝶阀
4-1
循环水泵
31
电磁流量调节阀
40
电磁温度调节阀
42
供水管三通阀
37-2
回水管三通阀
37-1
供水管截止阀
38-1
回水管截止阀
38-2
36
集水器温度传感器
28
底层胶结充填体温度传感器
30
U型换热盘管入口温度传感器
39
U型换热盘管出口温度传感器

图5

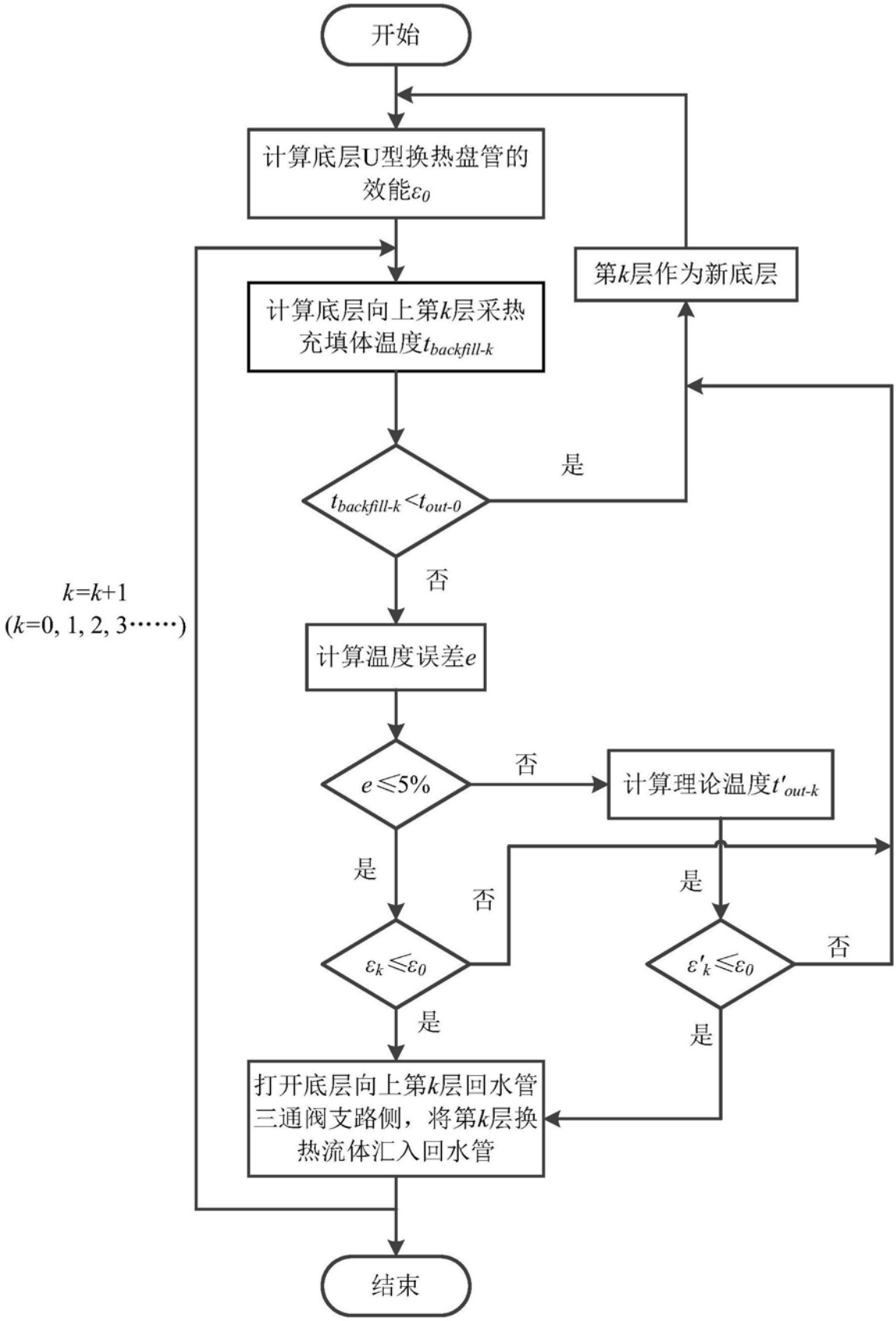

开始
计算底层U型换热盘管的效能$\varepsilon_0$
计算底层向上第$k$层采热充填体温度$t_{backfill-k}$
$t_{backfill-k}<t_{out-0}$
是
第$k$层作为新底层
否
$k=k+1$
($k$=0, 1, 2, 3……)
计算温度误差$e$
$e\leqslant 5\%$
否
计算理论温度$t'_{out-k}$
是
否
是
否
$\varepsilon_k\leqslant\varepsilon_0$
$\varepsilon'_k\leqslant\varepsilon_0$
是
是
打开底层向上第$k$层回水管三通阀支路侧，将第$k$层换热流体汇入回水管
结束

图6