

太阳能储热对地埋管换热器井群传热特性的影响

丛培德 李博 谷伟

天津地热开发有限公司

摘要：太阳能储热技术是一种高效利用自然资源的方法，它依赖于地下土壤、岩石和水体自身的热容量来实现能量的储存与释放。这一系统通过精心设计的钻孔闭式循环系统来运作，显著特点是采用了冷热分区布局的策略，并结合了智能化控制技术，以实现对我国地质条件的高效、创新利用。通过模拟计算，探究了不同储能温度对地埋管井群传热特性的影响。研究表明：利用太阳能储热来弥补取热量大于排热量的可行性。地下岩土层并不是单一的冷源或热源，而是具有一定蓄热、释热功能的蓄能体，无限增大储能温度，地埋管换热量不能显著性持续提高，同时系统总能耗将显著上升。基于井群换热性能与环境、经济效益的综合考虑，将以60℃~70℃作为储能温度推荐范围。

关键词：地埋管换热器；储能；能效系数；换热温差；单位埋深换热量

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.22.119

引言

中国地热能的利用和相关技术发展较晚，但一直在稳步前行。随着2017年首份国家级地热能规划发布^[1]，我国地热能开发利用进入一个全新的机遇期，截至到2020年底我国地热能供暖制冷面积累计达到13.9亿平方米，稳居世界第一^[2]。随着有关地热能相关政策文件的落地，更坚定了我们研究发展地热能技术的信心。我们预计到2025年，各地基本建立起完善规范的地热能开发利用管理流程，全国地热能开发利用信息统计和监测体系基本完善，地热能供暖（制冷）面积比2020年增加50%^[3]，地热能供暖、生物质供热、生物质燃料、太阳能热利用等非电利用规模达到6000万吨标准煤以上^[4]。发展至今，地热勘查逐步走向精细化，地热开发逐步走向集约化，地热利用逐步走向综合化，地热成为能源界真正的热点^[5]。

20世纪80年代，Lund^[6]等人对太阳能跨季节储能系统模型进行了简化，并在其基础上进行了仿真模拟计算。结果表明，太阳能集热器的材料、面积大小以及土壤蓄热体的体积是对于系统性能有很大的影响。同时，通过传统分析方法与仿真模拟的对比也体现出了仿真模拟计算方法的高效和强大。2016年，南京理工大学杨慧斌等^[7]基于地埋管跨季节储能优化了井群模型，以常规地埋管系统建设的成本为基准，得到了几种小埋深和小间距的组合方式，并对其中四组方案进行了数值模拟计算。结果表明，在能达到建筑所需负荷基础上，新型模式可以更好的节约成本；当地埋管间距较大时，土壤温度具有较小的平衡率，反之间距较小时不平衡率会增大，在考虑储能时，地埋管间距建议在1m以下。2021年，华北电力大学张辉等^[8]建立了井内解析解和井外数值解相

结合的储能式地埋管井群的数学模型，并通过实验数据验证了单井地埋管模型的准确性，而后在此基础上使用TRNSYS验证了整个地埋管井群的准确性。研究了土壤比热容、土壤导热系数、循环流量、井间距以及埋管深度等不同因素对于BEST运行的影响。研究了串联连接的地埋管井群的长期运行特性，对研究区域土壤温度场和地埋管进出口水温进行了分析，结果表明，井群向土壤注热量逐年减小，取热量逐年增多，但两者最终都趋于稳定状态。

在当前的能源利用领域，浅层地热能供暖（制冷）技术，特别是土壤源热泵系统，已经得到了广泛应用。在这个系统中，地埋管是一个至关重要的部分，它直接关系到系统的换热效率。简单来说，地源热泵系统的工作原理是通过地埋管与土壤进行热量交换：在夏天，系统会将多余的热量释放到土壤中，并从土壤中吸收冷量以制冷；而在冬天，则相反，系统会从土壤中吸收热量来供暖，并向土壤释放冷量。随着地源热泵技术的普及和管道布置密度的增加，一个问题逐渐浮出水面——土壤温度的不平衡。当系统长期运行时，某些区域的土壤可能会出现“过热”或“过冷”的现象。这意味着土壤的温度会逐渐偏离其作为理想冷、热源时的初始状态。随着时间的推移，这些偏差会累积，导致土壤的温度逐年上升或下降，从而影响到地埋管与土壤之间的换热效果。由于本项目地埋管井群的最大取热量>最大释热量，为研究土壤源热泵系统对周边土壤环境的影响，以及提升地源热泵系统的供能效率，在地埋管换热器的基础上，设置了太阳能补热系统，当取热量>释热量时，开启太阳能储热过程。

一、数学模型

（一）井内传热模型

双U型地埋管换热器在井孔内的结构主要包括两组独立的进（出）水管，以及用于填充空隙的回填材料。这些组件共同构成了换热器的内部结构，双U型地埋管平面示意图以及地埋管井孔内部传热机理与热阻分布模式见图1。为了确保分析的便利性和准确性，我们将对双U型地埋管换热器进行细致的划分：两个进口管（用 i_1 、 i_2 来表示）；两个出口管（用 o_1 、 o_2 来表示）；四处回填材料区域（用 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 来表示）。

假设U型地埋管换热器传热过程同时满足以下条件：管内循环溶液流速均匀、恒定；溶液自下降管流出后直接进入上升管；地埋管与井孔内回填材料以及回填材料与所在岩土层之间均不存在接触热阻。建立换热器管内循环溶液对流换热与管壁导热数学模型（1）-（4）、回填材料之间以及井孔壁传热数学模型（5）-（8）：

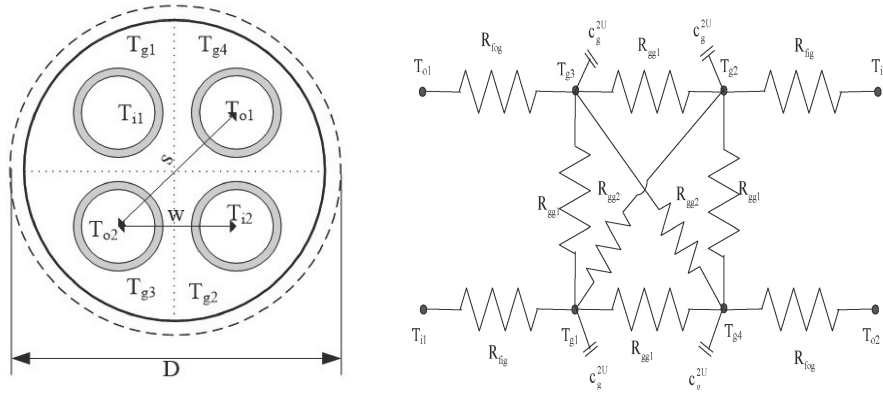


图 1 双 U 型地埋管换热器井孔内部结构及热阻关系图

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_r c_r T_{i1}) + \nabla \cdot (\rho_r c_r v_r T_{i1}) - \nabla \cdot (\Lambda_r \cdot \nabla T_{i1}) = H_{i1} & \text{in } \Omega_{i1} \\ q_{NT_{i1}} = -\Phi_{f_{ig}}(T_{g1} - T_{i1}) & \text{on } \Gamma_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_r c_r T_{i2}) + \nabla \cdot (\rho_r c_r v_r T_{i2}) - \nabla \cdot (\Lambda_r \cdot \nabla T_{i2}) = H_{i2} & \text{in } \Omega_{i2} \\ q_{NT_{i2}} = -\Phi_{f_{ig}}(T_{g2} - T_{i2}) & \text{on } \Gamma_{i2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_r c_r T_{o1}) + \nabla \cdot (\rho_r c_r v_r T_{o1}) - \nabla \cdot (\Lambda_r \cdot \nabla T_{o1}) = H_{o1} & \text{in } \Omega_{o1} \\ q_{NT_{o1}} = -\Phi_{f_{og}}(T_{g3} - T_{o1}) & \text{on } \Gamma_{o1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_r c_r T_{o2}) + \nabla \cdot (\rho_r c_r v_r T_{o2}) - \nabla \cdot (\Lambda_r \cdot \nabla T_{o2}) = H_{o2} & \text{in } \Omega_{o2} \\ q_{NT_{o2}} = -\Phi_{f_{og}}(T_{g4} - T_{o2}) & \text{on } \Gamma_{o2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g r_g c_g T_{g1}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda_g \nabla T_{g1}) = H_{g1} & \text{in } \Omega_{g1} \\ \begin{cases} q_{NT_{g1}} = -\Phi_{g_s}(T_s - T_{g1}) - \Phi_{f_{ig}}(T_{i1} - T_{g1}) - \Phi_{gg2}(T_{g2} - T_{g1}) \\ \quad - \Phi_{gg1}(T_{g3} - T_{g1}) - \Phi_{gg3}(T_{g4} - T_{g1}) \end{cases} & \text{on } \Gamma_{g1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g r_g c_g T_{g2}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda_g \nabla T_{g2}) = H_{g2} & \text{in } \Omega_{g2} \\ \begin{cases} q_{NT_{g2}} = -\Phi_{g_s}(T_s - T_{g2}) - \Phi_{f_{ig}}(T_{i2} - T_{g2}) - \Phi_{gg2}(T_{g1} - T_{g2}) \\ \quad - \Phi_{gg1}(T_{g3} - T_{g2}) - \Phi_{gg3}(T_{g4} - T_{g2}) \end{cases} & \text{on } \Gamma_{g2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g r_g c_g T_{g3}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda_g \nabla T_{g3}) = H_{g3} & \text{in } \Omega_{g3} \\ \begin{cases} q_{NT_{g3}} = -\Phi_{g_s}(T_s - T_{g3}) - \Phi_{f_{og}}(T_{o1} - T_{g3}) - \Phi_{gg2}(T_{g1} - T_{g3}) \\ \quad - \Phi_{gg1}(T_{g2} - T_{g3}) - \Phi_{gg3}(T_{g4} - T_{g3}) \end{cases} & \text{on } \Gamma_{g3} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g r_g c_g T_{g4}) - \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda_g \nabla T_{g4}) = H_{g4} & \text{in } \Omega_{g4} \\ \begin{cases} q_{NT_{g4}} = -\Phi_{g_s}(T_s - T_{g4}) - \Phi_{f_{ig}}(T_{o2} - T_{g4}) - \Phi_{gg2}(T_{g1} - T_{g4}) \\ \quad - \Phi_{gg1}(T_{g2} - T_{g4}) - \Phi_{gg3}(T_{g3} - T_{g4}) \end{cases} & \text{on } \Gamma_{g4} \end{cases} \quad (8)$$

式中： ε_g —回填材料的孔隙度；
 ρ_r 、 ρ_g —管内循环水和回填材料的密度， kg/m^3 ；
 c_r 、 c_g —管内循环水和回填材料的定压比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；
 Λ_r —管内循环水导热系数张量， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；
 T_{in} 、 T_{on} —进、出口循环水温度；
 v_r —竖直 2U 型地埋管内循环水流速， m/s ；
 T_s —岩土体温度， K ；
 T_{gm} —不同区域回填材料温度， K ($m=1, 2, 3, 4$)；

$q_{NT_{in}}$ 、 $q_{NT_{on}}$ —进、出口地埋管的法向热流量， W/m^2 ($n=1, 2$)；

$q_{NT_{gm}}$ —不同区域回填材料的法向热流量， W/m^2 ($m=1, 2, 3, 4$)；

H_i 、 H_o —进出口地埋管热源（汇）项， $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ；

H_{gm} —不同区域回填材料热源（汇）项， $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ($m=1, 2, 3, 4$)；

$\Phi_{f_{ig}}$ 、 $\Phi_{f_{og}}$ —流体分别与下降管壁和上升管壁的传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

Φ_{g_s} —岩土体与回填材料的传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

Φ_{gg1} 、 Φ_{gg2} —回填材料分别与相邻区域和对角区域的传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

(二) 岩土层传热模型

由于双 U 型地埋管井孔的直径远小于垂直深度，将地埋管井孔在岩土层传热过程概化为半无限大多孔介质中的有限长移动热源传热过程。地埋管换热器井孔的放（吸）热过程则认为是岩土层热运移模型中的源（汇）项。岩土层满足以下假设：岩土介质固相基质结构不发生变形；物性参数不随温度变化；忽略自然渗流过程。根据以上假设条件，确定岩土层三维非稳态传热模型：

$$\begin{cases} -\nabla \cdot (\rho_f E_f \varepsilon_s \mathbf{v}) + \nabla \cdot (A^{\text{cond}} \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (A^{\text{disp}} \cdot \nabla T) + Q_T = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_f E_f \varepsilon_s + \rho_s E_s (1 - \varepsilon_s)], (x, y, z) \in \Omega_f, t \geq 0 \\ T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega_f \\ T(x, y, z, t)|_{\Gamma_T} = T_T(x, y, z), (x, y, z) \in \Gamma_T, t \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： E_f —岩土层渗流溶液质量单元内能，J/kg；

V —渗流速度矢量，m/s；

E_s —岩土层固相基质质量单元内能，J/kg；

ρ_s —含水介质密度，kg/m³；

Λ^{cond} —含水层多孔介质与渗流溶液的有效导热系数张量，W/(m·K)；

Λ^{disp} —含水层热弥散系数张量，W/(m·K)；

Q_T —含水层热源（汇）项放（吸）热强度 J/(m³·s)；

热运移控制方程中岩土层中液相与固相基质内能 $E_{f(s)}$ 不随物性参数变化，认为是 $T_{f(s)}$ 的线性函数。由于渤海盆地浅层含水介质以粒径较小的粉砂为主，可认为固-液热交换平衡时间短暂，相同时间内同一含水介质中渗流溶液温度 T_f 与固相基质温度 T_s 相同。

二、计算区域物理模型与求解方法

（一）工程实例概化模型

在津能管业浅层地热能与太阳能协同开发利用示范工程中，采用直埋管式地源热泵系统为建筑提供冬季供暖、夏季制冷的基础负荷，利用空气源热泵和太阳能模块为建筑提供冬季供暖、夏季制冷的补充负荷。室外地埋换热孔的数量以地层换热特性为基础，按照能够满足1台热泵机组制冷、制热的情况进行设计。

根据井群布置方案，设定计算目标区域130×135m²，垂向上计算范围为0~-150m。在区域内自外而内设置了3个岩土层观测点，通过具有区域代表性的观测点的温度变化来反映计算区域局部的温度场的变化情况。井群布置如图2所示，井孔间距5m，在井孔内部，我们安装了深度达到120米的HDPE（高密度聚乙烯）垂直双U型地埋管换热器。这个换热器的具体参数以及用于回填的材料参数都详细列在表1中。

表1 2U型埋管换热器设计参数

典型参数/单位	数值
井孔深度 H/m	120
井孔直径 ψ /m	0.135
进（出）管径外径 d/m	0.025
进（出）管壁 b/m	0.0023
进出管中心距离 w/m	0.043
进（出）管壁导热系数 $\lambda_{p(i)}$ /W·(m·K) ⁻¹	0.6
循环液容积比热 $c_r \rho_r$ /J·(m ³ ·K) ⁻¹	4.18·10 ⁶
循环液导热系数 λ_r /W·(m·K) ⁻¹	0.65
回填材料导热系数 λ_g /W·(m·K) ⁻¹	1.9
回填材料容积比热 $c_g \rho_g$ /J·(m ³ ·K) ⁻¹	2.19·10 ⁶

根据现场试验结果，通过反复拟合、调整场区岩土层物性参数，确保取值范围合理，研究区域地下主要岩性参数见表2。为较精确的刻画出地埋管换热器以及所在岩土层温度场的演化过程，将整个物理模型按照垂直方向平均分为15层，每层土壤热物性均匀一致且不随时间改变。考虑网格数目对模型计算速度的影响，x、y平面上采取不等距网格剖分方式，靠近工作井区域网格加密。在构建物理模型时，我们采用了精心设计的网格划分方法。具体来说，在水平方向上，我们选择了三角形不等距的网格划分方式，以更精确地模拟不同区域的特性。而在垂直方向上，我们则选用了矩形网格划分，以简化计算并保持垂直方向的均匀性。这种组合形成了独特的棱柱单元体结构。如图3所示，我们的模型设计中，每一层水平断面包含了3000个网格单元。整个模型整合了所有层，总计包含了45000个网格单元。

表2 典型岩土层物性参数

岩土介质	孔隙率 ε_s	岩土体积比热容 $c_s \rho_s$ /J·(m ³ ·K) ⁻¹	岩土热导率 λ_s /W·(m·K) ⁻¹
黏土	0.4	3.2·10 ⁶	1.2
粗粉砂	0.35	2.4·10 ⁶	1.8
细粉砂	0.38	2.4·10 ⁶	1.6

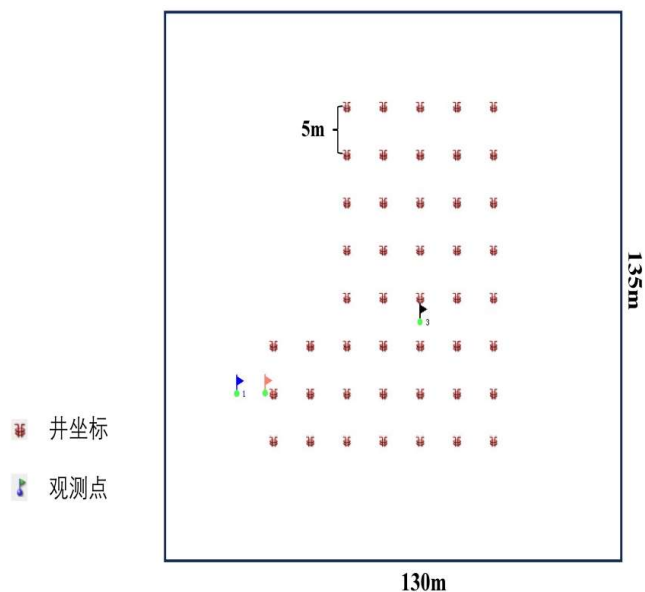


图2 井孔与观测点位置分布图

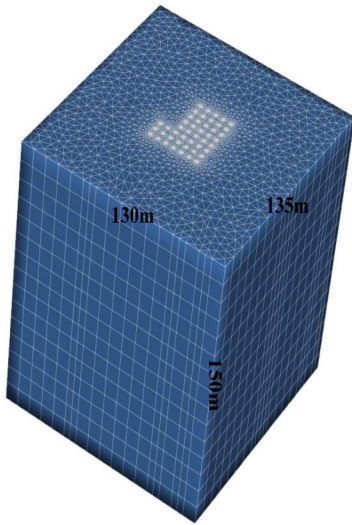


图3 计算区域三维网格划分图

(二) 定解条件与求解方法

将研究区域岩土层上部与底部的粉质黏土层定义为隔水、绝热边界，忽略大气降雨及蒸发影响。物理模型4个侧面均作为第1类定水头、定温边界；粗粉砂与细粉砂作为承压含水层，边界交互构成，存在水力与热量交换。根据双U地埋管换热器传热模型，选用有限元计算软件Feflow7.1进行数值求解。

采用标准伽辽金有限元法对传热、渗流控制方程进行整场离散；分别使用PCG算法（预处理共轭梯度）与BICGSTABP算法（后处理双共轭梯度）对地埋管井孔内外传热耦合模型进行计算。求解过程中采用变时步长法，最大与最小时间步长分别设定为0.5d、0.01d，每步长最大迭代次数3500次。选用2阶迎风离散格式对时间离散，提高方程求解效率，同时对网格划分独立性与运算收敛性进行一致性检验。

引入地埋管换热功率Q、地埋管能效系数E与单位埋深换热量q作为评价参数，量化不同运行工况下地埋管井群热运移方式、传热性能变化的影响程度。地埋管换热器能效系数E为实际换热量与最高理论换热量的比值，是随着换热时间推移而变化的瞬时无量纲参数。作为地埋管换热器逐时出水温度的线性函数，揭示不同运行工况下，地埋管换热性能偏离理论换热量的程度。

$$E = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Mc_r(T_i - T_o)}{Mc_r(T_i^n - T_o)} = \frac{T_i - T_o}{T_i^n - T_o} \quad (10)$$

地埋管单位埋深换热量由地埋管中循环水量、不同岩土层厚度及地埋管进出水温差共同决定；是直观描述不同运行工况下，地埋管在各岩土层中传热特性的评价参数。

$$q = \frac{c_r M}{l_n} \cdot |T_i^n - T_o^n| \quad (11)$$

三、运行方案与模拟结果分析

(一) 运行方案

由于本项目地埋管井群的最大取热量>最大释热量，为研究土壤源热泵系统对周边土壤环境的影响，以及提升地源热泵系统的供能效率，在地埋管换热器的基础上，设置了太阳能补热系统，当取热量>释热量时，开启太阳能储热过程。此次模拟是为了探究太阳能储热对弥补取热量大于释热量依此来提高换热效果的可行性。由于取热量>释热量，本文重点研究冬季供暖期太阳能储热对地埋管换热器井群传热特性的影响。

在数值模拟计算过程中，将1个运行周期（1年）划分为5个阶段，依次为夏季制冷期（120天）、秋季间歇期（60/45天）、储能期（0/15天）、冬季供暖期（150天）、春季间歇期（35天）。系统共计运行5个周期（5年），由于天津市属于冷热负荷季节性失调地区，因此将地埋管井群设置为非定功率取（排）热运行，制冷与供暖期地埋管换热器进水温度分别恒定为35℃、5℃；储能期分别以50℃、60℃、70℃进行储能；循环水流量为34m³/d。

(二) 模拟结果分析

选择地埋管换热器井群运行1年以及5年作为研究对象，分析不同储能温度下地埋管井群的换热性能变化。图4-图7给出了供暖工况下，地埋管井群的平均出水温度、换热功率、能效系数E与单位埋深换热量q的变化曲线。

图4-图5表示在第1年供暖工况结束时，地埋管井群的平均温差分别为1.89℃、2.04℃、2.12℃、2.15℃；换热功率为3.13kW、3.36kW、3.51kW、3.56kW；平均能效系数E为20.3%、21.1%、21.5%、21.8%；单位埋深换热量q为26.05W/m、28.03W/m、29.22W/m、29.63W/m。

数值模拟的结果显示，随着储能温度的逐渐提高，地埋管井群的平均出水温差也逐渐升高，但是升高的幅度却越来越小，与之对应的地埋管井群的换热功率、能效系数E与单位埋深换热量q均呈现出这种趋势。通过对这种趋势的进一步分析，可以看出随着储能温度的升高，冬季供暖过程中地埋管井群换热性能提高，地源热泵机组能效增强；然而当地温达到一定的阈值后，储能温度的提高对冬季供暖的影响减弱。

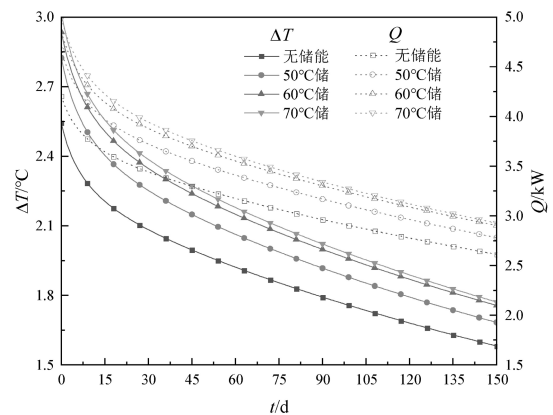


图4 不同储能温度下第1年供暖期地埋管井群平均出水温差及换热功率动态变化

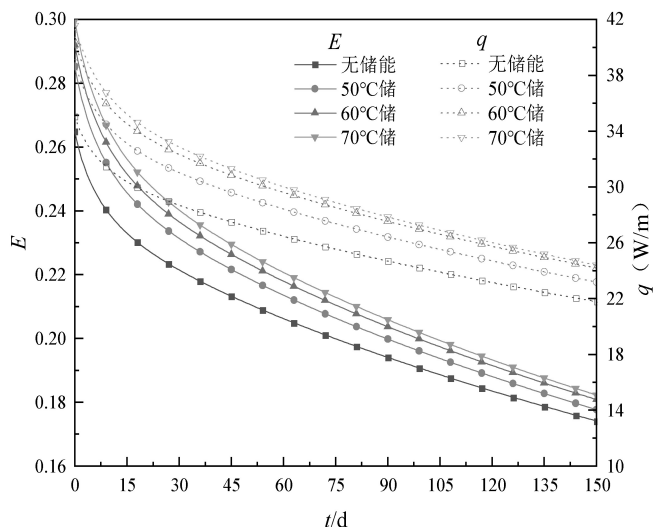


图5 不同储能温度下第1年供暖期地埋管井群平均能效系数及单位埋深换热量动态变化

图6-图7表示在第5年供热工况结束时，地埋管井群的平均出水温差、换热功率、能效系数E与单位埋深换热量q的变化曲线。地埋管井群的平均温差分别为1.75℃、2.10℃、2.23℃、2.26℃；换热功率为2.90kW、3.48kW、3.69kW、3.74kW；平均能效系数E为18.4%、20.0%、21.1%、21.3%；单位埋深换热量q为24.15W/m、28.99W/m、30.75W/m、31.15W/m。

数值模拟的结果显示，随着运行周期的推移，无储能期的地埋管井群的平均出水温差逐步下降，与之对应的地埋管井群的换热功率、能效系数E与单位埋深换热量q均呈现出这种趋势。以50℃、60℃、70℃进行储热后，地埋管井群的平均出水温差、换热功率、能效系数E与单位埋深换热量q均与第一个运行周期保持在一个较小的变化范围，可以看出在进行储能后，取热量和排热量达到了一个相对平衡的状态。

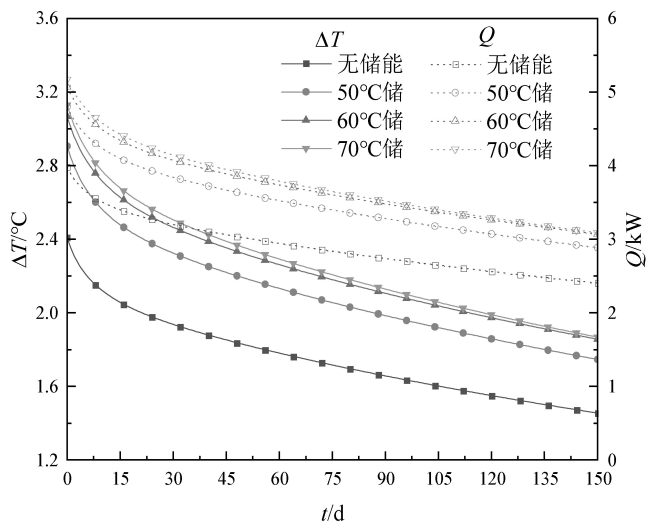


图6 不同储能温度下第5年供暖期地埋管井群平均出水温差及换热功率动态变化

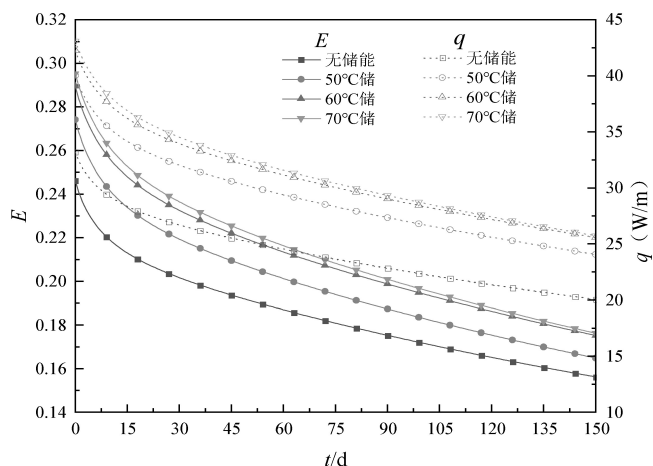


图7 不同储能温度下第5年供暖期地埋管井群平均能效系数及单位埋深换热量动态变化

四、结论

(1) 本文基于太阳能储热原理和土壤冷热堆积现象，运用模拟软件进行了数值模拟，通过改变储能温度，使供暖期的换热效果有所增强，说明了利用太阳能储热来弥补取热量大于排热量的可行性。

(2) 数值模拟结果显示，由于秋季间歇期开展15天不同温度的太阳能储热，供暖过程地埋管井群的换热温差比第一年增加了-0.14℃、0.06℃、0.11℃、0.11℃，通过研究分析可知，地下岩土层并不是单一的冷源或热源，而是具有一定蓄热、释热功能的蓄能体。井群所在区域夏季与储热期产生的“热堆积”现象，增强了岩土层跨季节蓄热能力。在冬季供热时期，岩土层温度高于初始阶段，与地埋管中循环水的温差增大，提高了该阶段地埋管换热能力。

(3) 选择地埋管换热器井群运行1年以及5年作为研究对象，在太阳能储热作用下，地埋管换热器井群传热性能提高，然而随着储能温度的逐渐提高，地埋管井群的平均出水温差、换热功率、能效系数E与单位埋深换热量也逐渐升高，但是升高的幅度却越来越小。进一步分析表明，无限增大储能温度，地埋管换热量不能显著性持续提高，同时系统总能耗将显著上升。基于井群换热性能与环境、经济效益的综合考虑，将以60℃~70℃作为储能温度推荐范围。

参考文献

[1] 国家发展和改革委员会，国家能源局，国土资源部. 地热能开发利用“十三五”规划[M]. 北京：中国计划出版社，2017.
 [2] 汪集昉. 地热能要结合其他新能源和可再生能源[N]. 中国科学报，2021-11-2(004).
 [3] 国家能源局. 关于促进地热能开发利用的若干意见[M]. 北京：中国计划出版社，2021.
 [4] 国家发展和改革委员会，国家能源局，财政部，等. “十四五”可再生能源发展规划[M]. 北京：中国计划出版社，2022.

作者简介：丛培德，1969-04，男，山东省文登市，副高级工程师，大学本科，研究方向：暖通、新能源、建筑管理工程等。