

中深层地热能同轴套管换热器储能发电系统 热力学性能分析

令兰宁¹, 姚尔人¹, 孙昊¹, 李瑞雄¹, 邹瀚森¹, 王焕然¹, 席光¹, 张孙孝²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 长安大学建筑工程学院, 710061, 西安)

摘要: 针对地热能发电技术效率低、稳定性差的问题, 提出一种兼具同轴套管取热技术和压缩空气储能技术特点的中深层地热能同轴套管换热器储能发电系统, 通过建立系统的热力学模型, 研究了典型工况下系统关键参数和热力学性能的演化规律, 揭示了不同运行特征下地热恢复与提取的动态机制。研究结果表明: 储能发电系统的运行分为非稳定循环和稳定循环阶段, 在非稳定循环阶段中, 热提取量和膨胀机输出功随循环次数的增加而增加, 而热补偿量和系统效率呈相反趋势变化; 当热提取量、热补偿量和地热消耗量达到平衡时, 储能发电系统从第8次循环进入稳定循环阶段, 稳定循环中各参数不随循环次数改变, 单次循环输出电量为 47 956.7 kW·h, 系统效率达到 63.5%; 通过提升压缩机压比和补热水流量可以提升地热恢复温度: 当压缩机压比由 6 提升至 7 时, 深度为 1 300 m、半径为 0.116 m 处, 岩土温度多提升 4.3 °C, 当补热水流量由 4.5 m³/h 提升至 6 m³/h, 同一处岩土温度多提升 6.4 °C, 该研究为提高地热能发电效率和稳定性提供了新方案。

关键词: 地热发电; 稳定性; 地热恢复; 热力学性能

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401012 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0126-12

Thermodynamic Performance Analysis of Medium and Deep Geothermal Energy Coaxial Tube Heat Exchanger Energy Storage and Power Generation System

LING Lanning¹, YAO Erren¹, SUN Hao¹, LI Ruixiong¹, ZOU Hansen¹,

WANG Huanran¹, XI Guang¹, ZHANG Sunxiao²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Architecture and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: This study presents a solution to address the efficiency and stability issues in geothermal energy power generation technology. A medium and deep geothermal energy coaxial tube heat exchanger energy storage and power generation system is proposed that integrates coaxial tube heat extraction technology with compressed air energy storage technology. By developing a thermodynamic model of the system, the evolution of key parameters and thermodynamic performance under typical operating conditions is analyzed, and the dynamic mechanism of geothermal recovery and extraction under different operating characteristics is examined. The results show that the operation of energy storage and generation system is divided into two phases: un-

stable cycle and stable cycle phase. In the unstable cycle phase, the heat extraction amount and expander output work increase with the number of cycles, while the heat compensation amount and the system efficiency exhibit the opposite trend. Once a balance is reached between heat extraction, heat compensation and geothermal consumption reach equilibrium, the system enters a stable cycle from the 8th cycle onwards. In this phase, the system parameters remain constant regardless of the number of cycles, and the output of a single cycle is measured at 47 956.7 kW · h, with a system efficiency as high as 63.5%. To increase the geothermal recovery temperature, the compressor pressure ratio and the flow rate of water for heat compensation can be adjusted. When the compressor pressure ratio is increased from 6 to 7, the geotechnical temperature at a depth of 1 300 m and a radius of 0.116 m is increased by 4.3 °C, and flow rate of water for heat compensation is increased from 4.5 to 6 m³/h, the temperature at the same site is increased by 6.4 °C. This study provides a promising approach to improve the efficiency and stability of geothermal energy generation.

Keywords: geothermal power generation; stability; geothermal recovery; thermodynamic proper

符号表

$\alpha_{yt}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	岩土热扩散率	Q_{HE}/J	热提取量
$c_{\text{CF}}/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	冷流体比热	Q_{HC}/J	热补偿量
$c_{\text{HF}}/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	热流体比热	$\dot{Q}/\text{kW}$	换热功率
$c_p/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	水比定压热容	$q_l/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$	线热源强度
$c_{yt}/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	岩土比热容	$R/(\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	传热热阻
D	循环周期	Re	雷诺数
f_c	摩擦系数	r_{COMP}	压缩机压比
$h_{\text{wg}}/(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	环形管换热系数	$T_{\text{fl}}/^\circ\text{C}$	环形管道水温度
$h_{\text{ng}}/(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	内管换热系数	$T_{\text{f2}}/^\circ\text{C}$	内管道水温度
$h_{\text{CF,in}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	冷流体进口焓	$T_b/^\circ\text{C}$	岩土温度
$h_{\text{CF,out}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	冷流体出口焓	$t_{\text{charge}}/\text{h}$	储能时长
$h_{\text{HF,in}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	热流体进口焓	$t_{\text{discharge}}/\text{h}$	释能时长
$h_{\text{HF,out}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	热流体出口焓	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	流速
$h_{\text{COMP,in}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	压缩机进口焓	$\dot{W}/\text{kW}$	功率
$h_{\text{COMP,out}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	压缩机出口焓	z/m	地下深度
$h_{\text{COMP,out}}^s/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	压缩机等熵压缩出口焓	$\alpha_s/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	热扩散率
$h_{\text{TURB,in}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	膨胀机进口焓	$\gamma/(\text{^\circ C} \cdot \text{km}^{-1})$	地热梯度
$h_{\text{TURB,out}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	膨胀机出口焓	ε/mm	等效粗糙度
$h_{\text{TURB,out}}^s/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	膨胀机等熵膨胀出口焓	$\eta/\%$	系统效率
L/m	最大深度	$\eta_{\text{PUMP}}/\%$	水泵效率
l/m	管道长度	$\lambda_{yt}/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	岩土导热系数
$\dot{m}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	质量流量	$\lambda_{\text{tl}}/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	填料导热系数
$\dot{m}_{\text{HE}}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	取热水质量流量	$\lambda_{\text{wg}}/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	外管导热系数
$\dot{m}_{\text{HC}}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	补热水质量流量	$\lambda_{\text{ng}}/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	内管导热系数
$p_{\text{PUMP,in}}/\text{Pa}$	水泵入口压力	$\rho_{\text{PUMP}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水泵工质密度
$p_{\text{PUMP,out}}/\text{Pa}$	水泵出口压力	$\rho_{yt}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	岩土密度

随着全球能源与环境问题的日益突出^[1],调整能源发展布局、推动能源绿色低碳转型、加大非化石能源供给已成为中国能源发展的重要布局。地热能作为世界各国重点研究开发的可再生能源,其主要被用于地热发电和地热供暖^[2]。2014年世界地热发电总量达到12.7 GW^[3],每年可以减少超过 10^9 t碳排放^[4]。地热资源主要包含水热型和干热岩型,现阶段,地热发电主要以水热型地热资源为主^[5],通过地下水闪蒸形成高温蒸汽推动汽轮机作功发电,但富含盐分的蒸汽会导致涡轮叶片腐蚀和运营费用剧增^[6],且闪蒸式地热发电系统循环效率仅在12%~20%之间。

干热岩型地热资源是蕴藏在热干岩体中的高品位热源,随深度增加其温度分布在150~650℃之间^[7],且其储量远大于水热型地热资源,具有广阔的地热发电前景;据初步测算,地球内部3~10 km深处蕴藏干热岩热量相当于全部化石燃料能量的30倍^[8]。美国于1977年对4 500 m处的干热岩进行了深度开发,发现岩体温度可达到330℃,并于1984年建成了世界上第一座10 MW高温岩体地热发电站^[9]。研究发现,我国干热岩地热资源同样具有巨大开发潜力,例如西藏那曲地区地温梯度接近99.3℃/km^[10],海南琼北白马井地区地温梯度达74.6℃/km^[11]。

中深层同轴套管换热器取地热具有换热量大^[12]和能效高^[13]等优点,通过将废弃油气井改造成地热井又大幅提升了其经济性,因此该技术逐渐成为干热岩地热的新兴利用形式^[14]。同轴套管换热器的具体结构如图1所示,包括内管和外管,通过将内外管嵌套形成用于传热工质循环流动的环形管道和内管道,两流道通过底部连通;由于要通过外管壁实现取热,外管采用高导热系数材料,而内管用于导流且保温传热工质采用绝热材料,这种取热方式由于取热不取水可避免设备腐蚀并保护地下水^[15]。

由于岩体的导热性能较差,干热岩型地热能在提取过程中无法稳定输出高温^[16],因此地热恢复是地热发电系统长期稳定运行的重要手段。地热自然恢复存在恢复周期长、恢复效果差等问题,用热水回灌补热则是有效的恢复方案,但其热源难以解决。

现阶段,针对中深层同轴套管地热利用主要聚焦在系统设计方法以及耦合储能系统,而绝热压缩空气储能系统(advanced adiabatic CAES, AA-CAES)储能规模大且建设运行成本低,但目前面临

蓄热成本高等难题^[17]。综上,本文将同轴套管换热器与压缩空气储能系统结合,将压缩空气储能系统产生的压缩热作为地热恢复热源以维持热能品位,并利用同轴套管换热器提取的热能加热膨胀机入口的高压空气,高温高压空气驱动膨胀机组作功并输出电能,实现了地热发电系统高效稳定输出电能。

1 系统介绍

中深层地热同轴套管换热器储能发电系统如图1和图2所示:系统由同轴套管换热器、水箱、管路阀门、水泵、压缩机组、膨胀机组、储气罐和换热器组成;水作为同轴套管换热器内传热工质;内管道和环形管道上方出口分别接内管管路、外管管路;水泵在预置阶段对水加压防止其汽化并驱动水克服管道阻力流动;地热取、补热水水箱用于存储高压水;将同轴套管换热器埋于地热井中,并在周围填充填料固定套管,用水泵驱动水箱水在同轴套管内流动,实现地热的提取和恢复。

在地热取热阶段,取热水水箱中的常温取热水由泵1驱动,通过外管管路进入环形管道,在环形管道自上而下流动的同时吸收周围岩土的热量,逐渐变为高温取热水并由套管底部从内管道自下而上流出,后向高压空气释放热量;在地热补热阶段,补热水水箱中的常温补热水由泵2驱动,在压缩机出口换热器中吸收储能阶段产生的压缩热变为高温补热水,并通过内管管路进入内管道,经过内管道导流到环形管道自下而上流动,同时将热量传递到岩土中,以维持地热能品位。

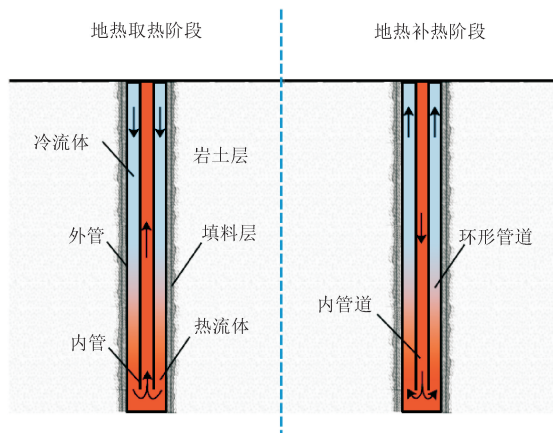


图1 同轴套管换热器结构及地热能取补热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial tube heat exchanger structure and geothermal energy extraction and compensation

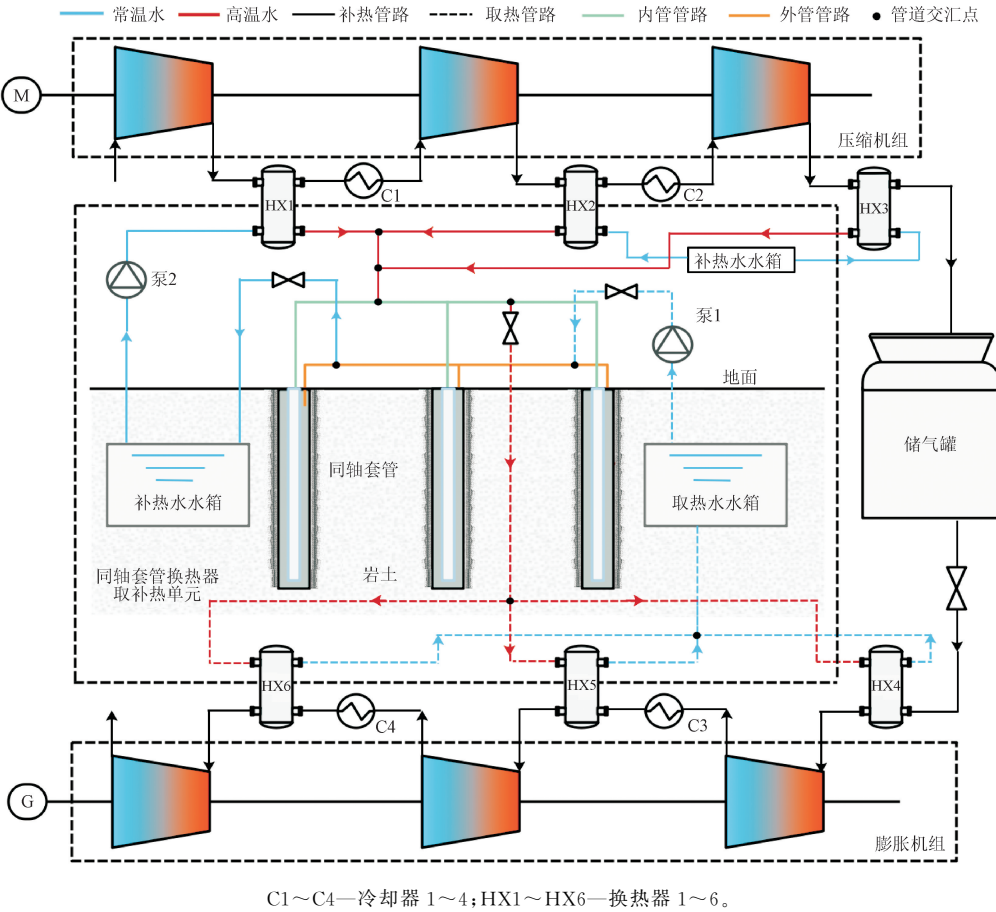


图 2 中深层地热能同轴套管换热器储能发电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of medium-deep geothermal energy coaxial tube heat exchanger energy storage and power generation system

在储能阶段(即地热补热阶段),利用低谷电驱动压缩机组压缩空气至目标压力并将其充入储气罐存储,用水冷却每级压缩机出口的高温空气以降低压缩耗功;在释能阶段(即地热取热阶段),储气室中的高压空气经节流阀稳定压力后释放,同时水泵驱动高温取热水在每级膨胀机入口前加热高压空气,高温高压的空气送入膨胀机组膨胀做功并带动发电机,实现地热能的可持续稳定发电。

2 系统热力学模型

由于同轴套管换热器提取地热过程复杂,为了方便模型的构建,在不影响计算精度的条件下,需要对实际问题进行适当简化。基本假设如下:①管内工质、管壁、填料层以及岩土热物性参数为常数;②不考虑由于地下水迁移而引起的热量传递,套管与土壤之间认为只有导热发生;③钻孔内的轴向传热由于其几何特征可以忽略不计;④随深度改变的环形管道和内管流道工质温度为截面平均值。

2.1 同轴套管内传热模型

2.1.1 管道能量方程

内管道能量方程可以表示为

$$\dot{m}c_p \frac{dT_{f2}(z)}{dz} = \frac{T_{f1}(z) - T_{f2}(z)}{R_{12}} \tag{1}$$

环形管道能量方程可以表示为

$$-\dot{m}c_p \frac{dT_{f1}(z)}{dz} = \frac{T_b(z) - T_{f1}(z)}{R_{11}} - \frac{T_{f1}(z) - T_{f2}(z)}{R_{12}} \tag{2}$$

2.1.2 传热热阻

由岩土层到环形管道流体的热阻为

$$R_{11} = \frac{\ln(d_6/d_5)}{2\pi\lambda_{yt}} + \frac{\ln(d_5/d_4)}{2\pi\lambda_{tl}} + \frac{\ln(d_4/d_3)}{2\pi\lambda_{wg}} + \frac{1}{\pi d_3 h_{wg}} \tag{3}$$

由环形管道流体到内管道流体的热阻为

$$R_{12} = \frac{1}{\pi d_2 h_{wg}} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_{ng}} + \frac{1}{\pi d_1 h_{ng}} \tag{4}$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 和 d_6 分别为内管内径、内管外径、外管内径、外管外径、填料层外径和岩土外径。

2.1.3 同轴套管内流体温度分布求解

为了方便计算,设

$$\theta_1(z) = T_b(z) - T_{f_1}(z) \quad (5)$$

$$\theta_2(z) = T_{f_2}(z) - T_b(z) \quad (6)$$

管内流体温度分布解由方程式(1)和(2)组成的微分方程组使用 d'Alembert^[18]方法解得

$$\theta_1(z) = C_1^* \exp(v_1^2 z) - C_2^* \exp(v_2^2 z) \quad (7)$$

$$\theta_2(z) = C_2^* \left(\frac{a - v_1^2}{a} \right) \exp(v_2^2 z) - C_1^* \left(\frac{a - v_2^2}{a} \right) \exp(v_1^2 z) + \gamma/a \quad (8)$$

式中

$$v_i = \frac{(-b + (-1)^{i+1} \sqrt{b^2 + 4ab})}{2}, i = 1, 2 \quad (9)$$

$$C_1^* =$$

$$\frac{\gamma/a - \theta_1' \exp(v_1^2 L) [(a - v_1^2)/a - 1]}{\exp(v_1^2 L) [(a - v_2^2)/a - 1] - \exp(v_2^2 L) [(a - v_1^2)/a - 1]} \quad (10)$$

$$C_2^* =$$

$$\frac{\gamma/a - \theta_1' \exp(v_1^2 L) [(a - v_2^2)/a - 1]}{\exp(v_1^2 L) [(a - v_2^2)/a - 1] - \exp(v_2^2 L) [(a - v_1^2)/a - 1]} \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{R_{12} c_p \dot{m}} \quad (12)$$

$$b = \frac{1}{R_{11} c_p \dot{m}} \quad (13)$$

$$\theta_1' = \theta_1(0) \quad (14)$$

2.1.4 地热取补热阶段线热源强度

地热取补热阶段线热源强度可以表示为

$$q_1 = \frac{|T_b(z) - T_{f_1}(z)|}{R_{11}} \quad (15)$$

2.2 管外岩土传热模型

取热对管外岩土温度场的影响由格林函数积分得到的线热源响应模型求解,表示在位置坐标 (x', y', z') 处产生垂直于地面的线热源,线热源强度分布函数为 $q_1(z')$,作用时间为 τ ,对位置坐标 (x, y, z) 处的岩土所产生的热响应^[19]为

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{1}{4\pi\lambda_{yt}} \int_0^L q_1(z') \cdot \left(\frac{\operatorname{erfc}(r_- / 2 \sqrt{a_{yt}\tau})}{r_-} - \frac{\operatorname{erfc}(r_+ / 2 \sqrt{a_{yt}\tau})}{r_+} \right) dz' \quad (16)$$

式中

$$r_- = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (17)$$

$$r_+ = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z + z')^2} \quad (18)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du \quad (19)$$

$$a_{yt} = \frac{\lambda_{yt}}{\rho_{yt} c_{yt}} \quad (20)$$

用地热质量折损率表示系统运行结束后地热能质量衰减的程度

$$\omega = \frac{T_b(z)_{t=0} - T_b(z)}{T_b(z)_{t=0}} \quad (21)$$

2.3 压缩空气储能单元热力学模型

压缩机的绝热效率为

$$\eta_{\text{COMP}} = (h_{\text{COMP,out}}^* - h_{\text{COMP,in}}) / (h_{\text{COMP,out}} - h_{\text{COMP,in}}) \quad (22)$$

压缩机的功耗为

$$\dot{W}_{\text{COMP}} = \dot{m}_{\text{COMP}} (h_{\text{COMP,out}} - h_{\text{COMP,in}}) \quad (23)$$

膨胀机的绝热效率为

$$\eta_{\text{TURB}} = (h_{\text{TURB,in}} - h_{\text{TURB,out}}) / (h_{\text{TURB,in}} - h_{\text{TURB,out}}^*) \quad (24)$$

膨胀机的输出功为

$$\dot{W}_{\text{TURB}} = \dot{m}_{\text{TURB}} (h_{\text{TURB,in}} - h_{\text{TURB,out}}) \quad (25)$$

泵的功耗^[20]为

$$\dot{W}_{\text{PUMP}} = (P_{\text{PUMP,in}} - P_{\text{PUMP,out}}) \dot{m}_{\text{PUMP}} / (\rho_{\text{PUMP}} \eta_{\text{PUMP}}) \quad (26)$$

换热器的换热量为

$$\dot{Q}_{\text{HX}} = c_{\text{CF}} \dot{m}_{\text{CF}} (h_{\text{CF,out}} - h_{\text{CF,in}}) = c_{\text{HF}} \dot{m}_{\text{HF}} (h_{\text{HF,in}} - h_{\text{HF,out}}) \quad (27)$$

压缩空气储能子系统质量守恒,表达式如下式

$$t_{\text{charge}} \dot{m}_{\text{COMP}} = t_{\text{discharge}} \dot{m}_{\text{TURB}} \quad (28)$$

2.4 热提取量和补偿量计算

热提取量为释能阶段提取的热量

$$Q_{\text{HE}} = \int c_p \dot{m}_{\text{HE}} (T_{\text{HE,out}} - T_{\text{HE,in}}) dt \quad (29)$$

热补偿量为储能阶段补偿的热量

$$Q_{\text{HC}} = \int c_p \dot{m}_{\text{HC}} (T_{\text{HC,in}} - T_{\text{HC,out}}) dt \quad (30)$$

2.5 同轴套管内沿程阻力损失计算

管道沿程阻力损失为

$$\Delta p = f_c \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (31)$$

摩擦系数^[21]表示为

$$\frac{1}{f_c} = 1.74 - 2 \lg \left(\frac{2\epsilon}{d} + \frac{18.7}{Re \sqrt{f_c}} \right) \quad (32)$$

2.6 系统评价指标

选取系统效率作为系统的评价指标,系统效率定义为释能过程的发电量与该周期(一个周期为一天,包含一个储能过程和释能过程)的总能耗

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{TURB}} t_{\text{discharge}}}{\dot{W}_{\text{COMP}} t_{\text{charge}} + \int d\dot{W}_{\text{PUMP}} t + Q_{\text{HE}} - Q_{\text{HC}}} \quad (33)$$

3 计算结果与分析

3.1 典型工况参数选取

中深层地热能同轴套管换热器取补热单元主要参数选取见表 1,压缩空气储能单元典型工况热力学分析的主要参数选取见表 2。

表 1 中深层地热能同轴套管换热器取补热单元参数选取

Table 1 Parameter selection of unit for coaxial tube heat exchanger of medium and deep geothermal energy for heat extraction and compensation

输入参数	数值
地热取热时间/h	8
地热补热时间/h	8
补热水水箱温度/℃	10
取热水水箱温度/℃	10
地热井数	3
单个地热井取热水入口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	12
单个地热井补热水入口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	9
管道等效粗糙度	0.5
地温梯度/(℃·m ⁻¹)	0.08
地表温度/℃	10
岩土导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	3.5 ^[22]
填料导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	3.0 ^[23]
外管导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	54
岩土热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	915
内管热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	2 300
外管热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	460
填料热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	1 800
水热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	4 186

表 2 压缩空气储能单元参数选取

Table 2 Compressed air energy storage unit parameters selection

输入参数	数值
储能时间/h	8
释能时间/h	8
储能系统空气质量流量/(kg·s ⁻¹)	10.6
换热器接近点温度/℃	5 ^[24]
环境温度/℃	10
环境压力/Pa	101 000
压缩机压比	8
压缩机级数	3
膨胀机级数	3
压缩机绝热效率	0.88 ^[25]
膨胀机绝热效率	0.88 ^[26]
水泵效率	0.88 ^[27]
储气罐压力差/MPa	2

3.2 系统计算流程

根据图 3 中系统计算流程进行计算,在系统达到稳定后,一个周期内各部件的功和热量计算结果见表 3。

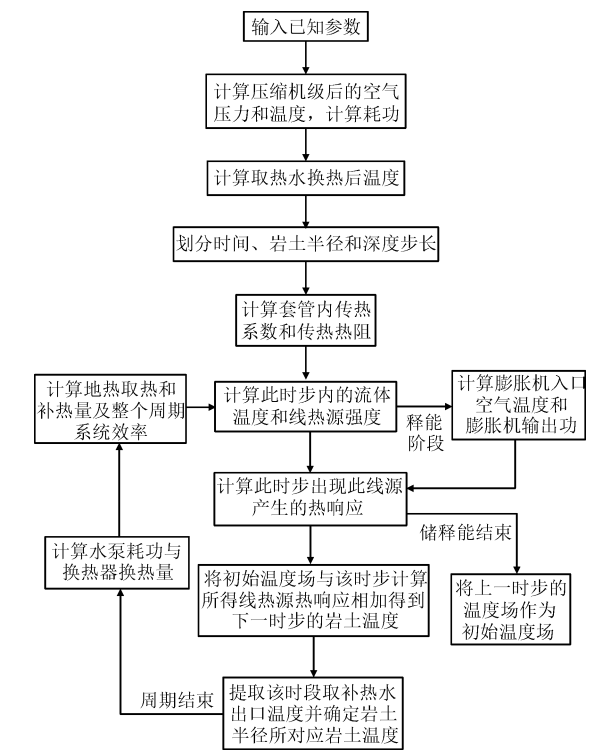


图 3 系统计算流程图

Fig. 3 System calculation flow chart

表 3 系统处于稳态时周期内各部件的计算结果

Table 3 Calculation of heat and work of each component during the cycle when the system is in steady state

参数	数值
压缩机 1 耗功/(kW·h)	22 327.4
压缩机 2 耗功/(kW·h)	22 530.2
压缩机 3 耗功/(kW·h)	24 740.3
膨胀机 1 输出功/(kW·h)	16 813.6
膨胀机 2 输出功/(kW·h)	15 581.7
膨胀机 3 输出功/(kW·h)	15 561.4
热提取量/(kW·h)	61 990.6
热补偿量/(kW·h)	56 260.8
地热消耗量/(kW·h)	5 729.8
水泵耗功(沿程阻力损失)/(kW·h)	32.6
系统效率/%	63.5

3.3 系统典型工况计算结果及分析

3.3.1 管内工质温度变化

图 4 所示为系统第一个循环周期内地热取热阶段,环形管道取热水温度和内管道取热水温度的变

化,展示了在开始取热 0.8、2.4、4.0、5.6 和 7.2 h 后的管内取热水温分布。在同一时间内,环形管道水温随深度增加快速上升,原因是取热水在环形管道向下流动过程中不断吸收来自岩土的热能,因此取热水升温;内管采用绝热材料因此内管道水温随深度变化小。

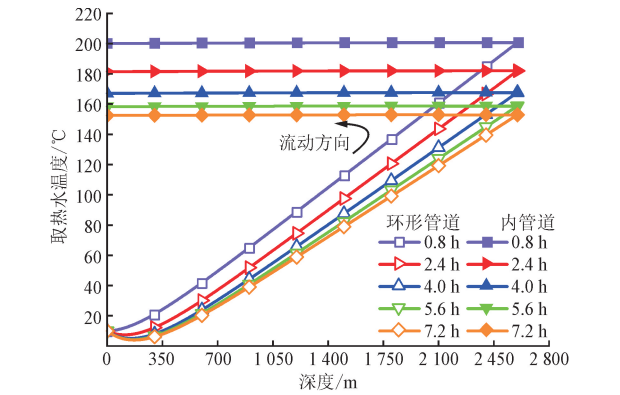


图 4 第一个循环周期套管内取热水温度变化情况
Fig. 4 The change of temperature of water for heat extraction in the tube at the first cycle

图 5 展示了线热源随深度的变化趋势,对比图 4 中不同时间,所有位置的取热水温都在下降,这是由于在取热的过程中不断吸收周围岩土的热量,导致管壁周围的岩土温度剧烈下降,又因为岩土的热导性不足以快速导热以致将远处的地热能迅速向管壁周围传导,因此线热源强度随时间降低;在 0~900 m 深度区间的线热源强度随深度快速上升,900~2 600 m 趋于不变。

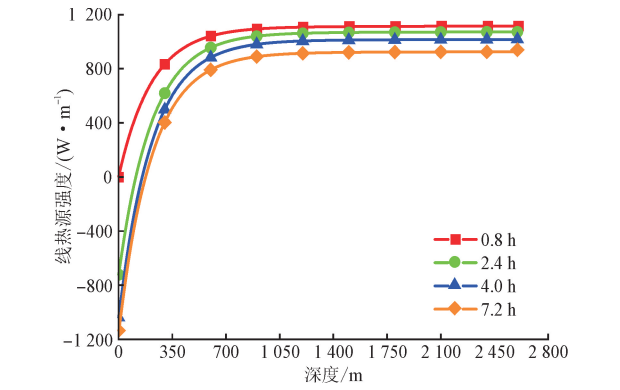


图 5 第一个循环周期不同取热时间后线热源强度变化情况
Fig. 5 Variation of heat source intensity in the first cycle of heat extraction

图 6 所示为系统第一个循环周期不同取热时间后地热补热时管内不同深度补热水温随时间的变化,揭示了在开始补热 0.8、1.6、3.2 和 7.2 h 后的管内补热水温。内管水温随时间和深度几乎不变,

因为补热水的热源来自于储能阶段压缩机压缩空气所产生的压缩热,而压缩机的压比和性能恒定,产生的压缩热品位和功率一定,因此补热水进口温度不变,又因内管有保温作用,最终引起此现象;而环形管道内同一深度的补热水温随时间增大,这是由于随着给管内充入补热水并持续为地下岩土补偿地热取热阶段损耗的热量,套管周围的岩土温度都在迅速上升并引起补热线热源强度下降,进一步地热补热速率和补热水热量损耗变慢,因此环形管道内补热水温上升。

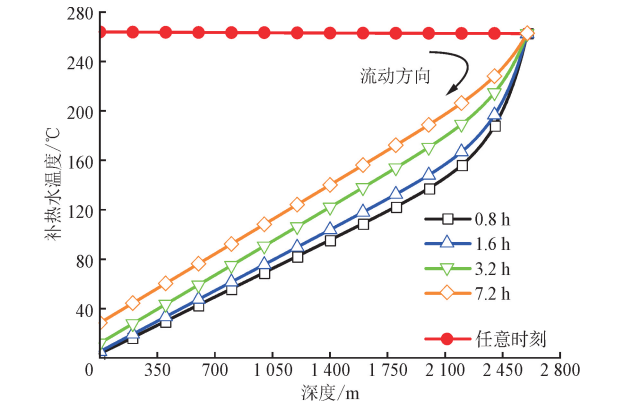


图 6 第一个循环周期不同取热时间后套管内补热水温度变化情况
Fig. 6 The change of temperature of water for heat compensation in the tube at the first cycle

图 7 展示了系统在第 1、3、6、8 和 10 个循环周期,补热水出口温度的变化。同一周期的各个时间温度一直上升,其原因与图 6 环形管道内补热水温上升的原因一致;其次随着循环周期数的增加补热水出口温度也在提高,这是由于在当前工况下,补热使岩土温度随周期升高,因此补热的线热源强度降低,最终导致此现象;直到系统进入稳定循环阶段后,补热水出口温度不再随周期数改变。

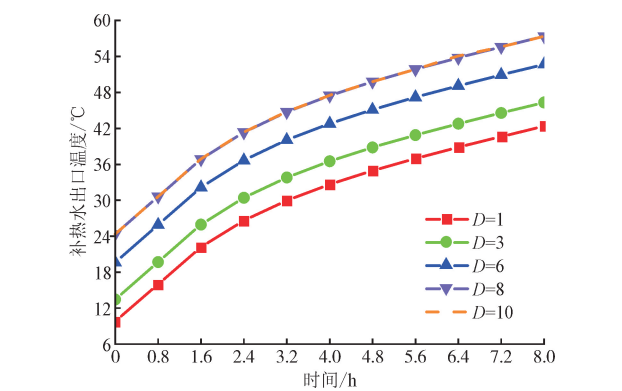


图 7 各个循环周期补热水出口温度随时间的变化
Fig. 7 Variation of outlet temperature of water for heat compensation with time for each cycle

3.3.2 取热阶段同轴套管周围岩土温度变化

在第一个周期取热阶段,不同深度的岩土温度沿半径分布随取热时间变化如图 8 所示。图 8(a)和 8(b)分别表示第一个循环周期内取热阶段 1 300 m 和 2 600 m 处沿套管半径方向岩土温度分布随时间的变化,虽然深度相差较大,但总的变化规律一致。地热取热会形成沿半径减小方向岩土温度降低的现象,把取热后岩土温度低于初始岩土温度的区域称为取热影响范围,而随时间取热影响范围的半径越来越大,这是由于周围岩土因为管内取热形成温差,继而引起管外岩土出现由远及近的导热。

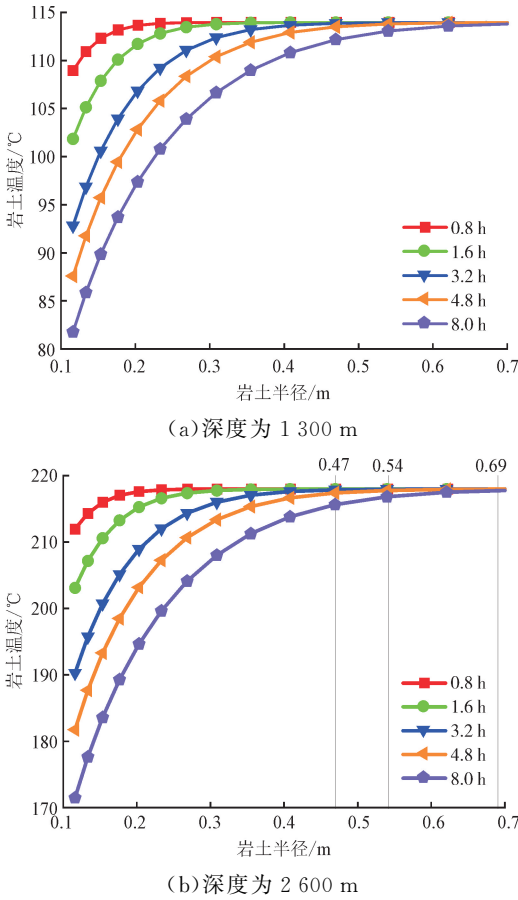


图 8 第一个周期不同取热时间后岩土温度沿半径分布随时间的变化

Fig. 8 Variation of geotechnical temperature along the radius distribution with time during the first cycle heat extraction phase

取热影响半径的扩展速度随时间逐渐减弱,正如图 8(b)中展示:3.2~4.8 h 内影响半径扩大了 0.07 m,而 4.8~8.0 h 内影响半径仅仅扩大了 0.15 m,这是由于图 5 中,取热的线热源强度随时间递减。

3.3.3 补热阶段同轴套管周围岩土温度变化

在第一个周期补热阶段,不同深度的岩土温度

沿半径分布随补热时间变化如图 9 所示。图 9(a)和 9(b)分别表示第一个循环周期补热阶段 1 300 m 和 2 600 m 深度沿套管半径方向岩土温度分布随时间的变化,不同深度变化同样类似;在地热补热的初期,因为用于补热的工质与管外岩土温度相差最大,因此补热的线热源强度强,同样在补热前期岩土温度的恢复速度快,如图 9(a)所示,半径为 0.116 m 处的岩土温度在 0.8~2.4 h 内恢复了 16.1 °C,而在 2.4~4.0 h 内仅仅恢复了 9.4 °C。

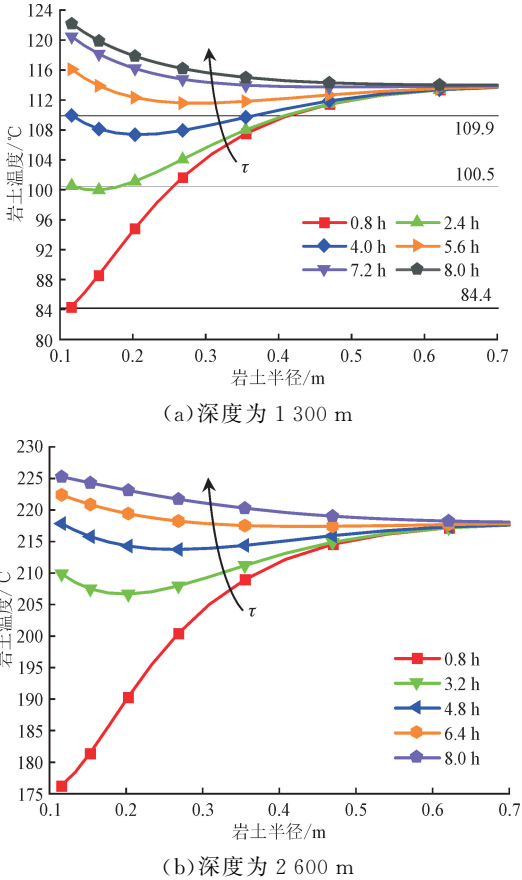


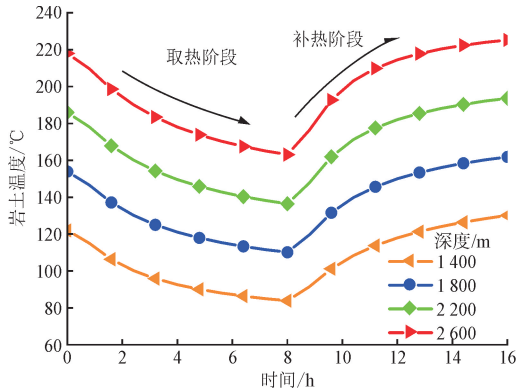
图 9 第一个周期不同补热时间后岩土温度沿半径分布随时间的变化

Fig. 9 Variation of geotechnical temperature along the radius distribution with time during the first cycle heat compensation phase

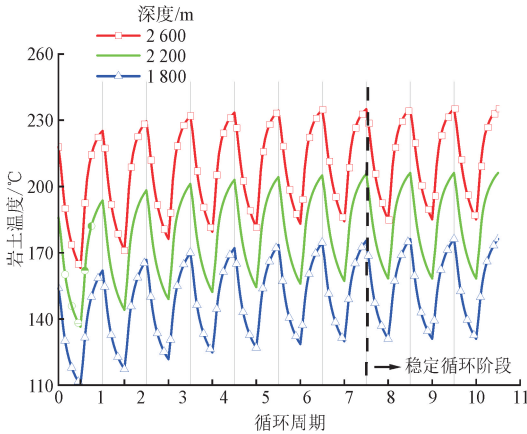
3.3.4 时间尺度上岩土温度变化规律分析

图 10(a)和 10(b)分别表示第 1 个循环周期和前 10 个循环周期内,距管轴半径为 0.166 m 的不同深度处岩土温度变化情况,温度下降阶段为取热阶段,温度上升阶段为补热阶段;图 10(a)中取热阶段岩土温度下降速率减缓,是因为图 5 所示取热时线热源强度随时间减弱,同理在补热阶段,温度上升速率减缓也是由于补热时线热源强度减小;图 10(b)中随着循环周期数的增大,在第 8 个循环周期达到

稳定,表现为在第 8 个循环周期之后岩土温度在每个周期内的变化曲线一致,因为典型工况下岩土温度的恢复水平是确定的,因此随着循环周期数的推进,最终会达到一个岩土温度变化的动态平衡。



(a) 第 1 个循环周期



(b) 前 10 个循环周期

图 10 不同深度岩土温度变化

Fig. 10 Variation of geotechnical temperature at different depths

3.3.5 系统工况参数变化规律分析

图 11 为各个周期内取热阶段取热水出口温度随时间的变化规律,在同一周期内,取热水出口温度随时间降低,这是因为取热线热源强度下降导致取热水在套管内流动所吸收的热量减少。

对比不同周期,发现随着周期数的增加,取热水出口温度整体上升,而第 8 个周期和第 10 个周期的取热水出口温度曲线重合,说明周期数增加到一定值后,取热工质的温度不随周期数改变,达到动态平衡,这是由于在系统刚开始运行的岩土温度相比稳定循环阶段较低,而在岩土温度达到动态平衡前,每个周期内同一时间岩土温度随周期数一直升高,而取热线热源强度也随之升高,最终导致在达到稳定前,取热水温度随周期数升高;随着岩土温度随循环周期数升高,取热线热源强度增大而补热线热源强度减小,而当热提取量、热补偿量和地热消耗量达

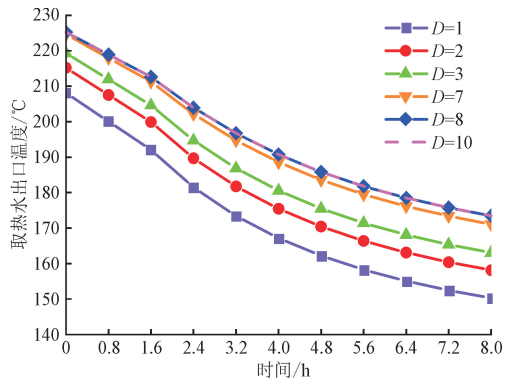


图 11 各个循环周期取热水出口温度随时间的变化

Fig. 11 Variation of outlet temperature of water for heat extraction with time for each cycle

到平衡时,整个系统就会进入稳定循环阶段,即岩土温度、出口热水温度等参数不随周期数产生变化。

图 12 表示热提取量、热补偿量、膨胀机输出功和系统效率随周期数的变化:热提取量随周期数升高而热补偿量随周期数降低,最后都保持不变。热提取量和热补偿量的变化是由于补热能使恢复岩土温度高于初始地温,同一时间岩土温度随周期数一直升高,因此导致取热温差增大和补热温差减小,进一步造成热提取量的升高和热补偿量的降低;而膨胀机输出功与进入膨胀机的空气温度为正相关,由于膨胀机入口冷空气的热源为取热水,因此压缩空气温度和取热水出口温度为正相关,由图 6 取热水出口温度的变化,最终导致膨胀机输出功随周期数上升并最终趋于不变;虽然膨胀机的输出功增大,但地热取热量也在增大,且其增大程度远大于膨胀机输出功,因此在系统达到稳定周期前,效率降低。

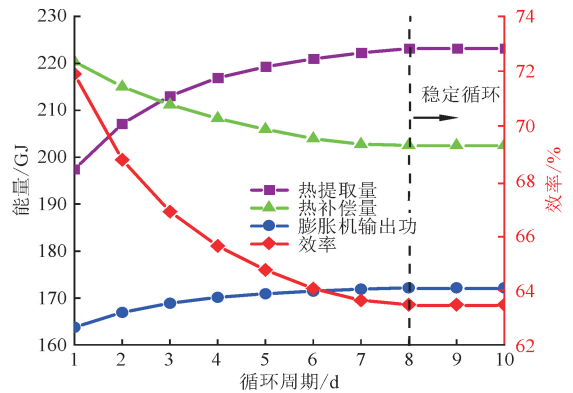


图 12 热提取量、热补偿量、膨胀机输出功和系统效率随周期数的变化

Fig. 12 Variation of heat extraction, heat compensation, expander output work and system efficiency with cycle number

3.3.6 工况参数对地热恢复能力的影响分析

图 13 是当填料导热系数为 $0.93\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 时,深度为 $1\,300\text{ m}$ 岩土恢复情况随压缩机压比的变化情况,可以看出在同时间,压缩机压比为 7 时,岩土温度更高,即压缩机压比越高,则岩土在补热阶段恢复越快,这是由于压缩机压比越大,则其出口的空气温度越高,由于补热水的热源来自于空气的压缩热,因此补热水入口的温度更高,其补热线热源强度也越大,引起地热恢复速度加快。并且在压比为 7 的补热末端, $1\,300\text{ m}$ 临近管道处岩土温度已经高于初始地温,这是管内同深度补热水高于初始岩土温度所导致的地热补热过度情况。

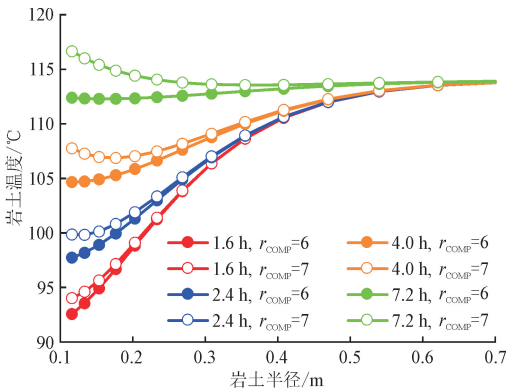


图 13 $1\,300\text{ m}$ 处不同补热时间后地热恢复情况随压缩机压比的变化
Fig. 13 Variation of geothermal recovery at $1\,300\text{ m}$ with compressor pressure ratio

图 14 是当压缩机压比为 8、填料导热系数为 $0.93\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 时,深度为 $1\,300\text{ m}$ 岩土恢复情况随补热水流量的变化情况;补热水流量越大则管内流速越快,管内扰动越大引起换热系数的增大,因

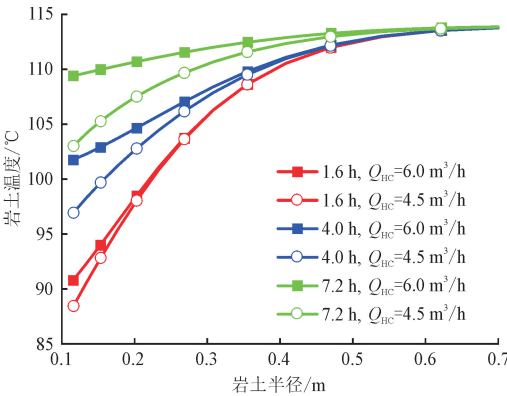


图 14 不同补热时间后不同补热水流量对 $1\,300\text{ m}$ 处地热恢复影响
Fig. 14 Effect of different flow rates of water for heat compensation on geothermal recovery at $1\,300\text{ m}$

此补热速率也越快,从图 14 中可以看到,当流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 时的补热末端,其岩土温度分布曲线相比于流量为 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 更加平缓,也说明了增大管内水流量可以提升补热效果。

4 结 论

为实现干热岩型地热能高效稳定发电,本文提出了一种中深层地热能同轴套管换热器储能发电系统,并对该系统进行热力学特性分析,结论如下。

(1)利用储能系统产生的压缩热对热提取后的地热能进行快速热恢复,有效避免地热品位的快速下降,实现持续高品位利用地热能发电的目的。典型工况下单周期内取热水出口温度最终稳定在 $175\sim 225\text{ }^{\circ}\text{C}$,地热消耗量为 $5\,729.8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

(2)在非稳定循环阶段,热提取量和膨胀机输出功率随循环次数的增加而增加,而热补偿量和系统效率变化呈相反趋势;当热提取量、热补偿量和地热消耗量达到平衡后,储能发电系统从第 8 次循环进入稳定循环阶段,稳定循环中各参数不随循环次数改变,单次循环输出电量为 $47\,956.7\text{ kW}\cdot\text{h}$,系统效率达到 63.5% 。

(3)增加压缩机压比和补热水流量可以提升地热恢复温度:当压缩机压比由 6 提升至 7,深度为 $1\,300\text{ m}$ 、半径为 0.116 m 处的岩土温度多提升 $4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,当补热水流量由 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 提升至 $6\text{ m}^3/\text{h}$,同一处岩土温度多提升 $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

[1] 杨培志,陈嘉鹏,陈君文,等. 双 U 型地埋管换热器换热性能模拟分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1733-1738.
YANG Peizhi, CHEN Jiapeng, CHEN Junwen, et al. Simulation and analysis of heat transfer performance of double U-tube ground heat exchangers [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 1733-1738.
[2] 毕玉荣. 地热资源开发应用现状及前景综述 [J]. 石油石化节能, 2011, 1(10): 7-10.
BI Yurong. Overview of the current situation and prospects of geothermal resources development and application [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2011, 1(10): 7-10.
[3] HAMMONS T J. Geothermal power generation worldwide [C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 8.

- [4] SHORTALL R, DAVIDSDOTTIR B, AXELSSON G. Geothermal energy for sustainable development: a review of sustainability impacts and assessment frameworks [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 391-406.
- [5] 曹锐, 多吉, 李玉彬, 等. 我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(10): 1623-1631.
CAO Rui, DUO Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(10): 1623-1631.
- [6] LÜ Tai, GAO Xuewei, WANG Xiaodong, et al. The geothermal power and main technical problems [C]// 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-4.
- [7] 杨吉龙, 胡克. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述 [J]. *世界地质*, 2001, 20(1): 43-51.
YANG Jilong, HU Ke. A review of hot dry rock (HDR) research and development in the world [J]. *World Geology*, 2001, 20(1): 43-51.
- [8] 饶松, 黄顺德, 胡圣标, 等. 中国陆区干热岩勘探靶区优选: 来自国内外干热岩系统成因机制的启示 [J]. *地球科学*, 2023, 48(3): 857-877.
RAO Song, HUANG Shunde, HU Shengbiao, et al. Exploration target selection of hot dry rock in Chinese continent: enlightenment from genesis mechanism of global hot dry rock system [J]. *Earth Science*, 2023, 48(3): 857-877.
- [9] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展 [J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 42-45.
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofo, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 42-45.
- [10] 金春爽, 付修根, 陈文彬, 等. 藏北地区钻孔大地热流值测量 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(8): 3095-3105.
JIN Chunshuang, FU Xiugen, CHEN Wenbin, et al. Measurements of borehole heat flow in northern Tibet [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(8): 3095-3105.
- [11] 石小蒙. 琼北盆地地热田特征及流量—温度耦合模型研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [12] 刘俊, 蔡皖龙, 王泮浩, 等. 深层地源热泵系统实验研究及管井结构优化 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(9): 2143-2150.
LIU Jun, CAI Wanlong, WANG Fenghao, et al. Experimental study and tube structure optimization of deep borehole ground source heat pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(9): 2143-2150.
- [13] 邓杰文, 魏庆芃, 张辉, 等. 中深层地热源热泵供暖系统能耗和能效实测分析 [J]. *暖通空调*, 2017, 47(8): 150-154.
DENG Jiewen, WEI Qingpeng, ZHANG Hui, et al. On-site measurement and analysis on energy consumption and energy efficiency ratio of medium-depth geothermal heat pump systems for space heating [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(8): 150-154.
- [14] 满意, 姜国心, 杜甜甜, 等. 利用弃井开采中深层地热名义取热量的模拟 [J]. *山东建筑大学学报*, 2019, 34(4): 20-24.
MAN Yi, JIANG Guoxin, DU Tiantian, et al. Modeling of deep and middle geothermal energy utilization in abandoned oil wells [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2019, 34(4): 20-24.
- [15] 韩二帅, 张家护, 鲁冰雪, 等. 中深层地热能供热技术综述及工程实例 [J]. *区域供热*, 2019(2): 79-83, 95.
HAN Ershuai, ZHANG Jiahu, LU Bingxue, et al. Summary and engineering cases of medium-depth geothermal heating technology [J]. *District Heating*, 2019(2): 79-83, 95.
- [16] 林涛. 地热资源的开发利用及可持续发展策略 [J]. *新型工业化*, 2022, 12(7): 33-36.
LIN Tao. Development and utilization of geothermal resources and sustainable development strategies [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(7): 33-36.
- [17] ZHOU Qian, DU Dongmei, LU Chang, et al. A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system [J]. *Energy*, 2019, 188: 115993.
- [18] GOLDSTEIN J A, SANDEFUR J T J. An abstract d8217; Alembert formula [J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1987, 18(3): 842-856.
- [19] ZHAO Yazhou, MA Zhibo, PANG Zhonghe. A fast simulation approach to the thermal recovery characteristics of deep borehole heat exchanger after heat extraction [J]. *Sustainability*, 2020, 12(5): 2021.
- [20] LI Ruixiong, TAO Rui, YAO Erren, et al. Comprehensive thermo-exploration of a near-isothermal compressed air energy storage system with a pre-compressing process and heat pump discharging [J]. *Energy*, 2023, 268: 126609.

[21] 袁佳多. 不可压缩流体管道阻力损失计算 [J]. 酒 • 饮料技术装备, 2019(5): 65-68.

YUAN Jiaduo. Calculation of resistance loss in incompressible fluid pipeline [J]. Brew & Beverage Technology and Equipment, 2019(5): 65-68.

[22] HUANG Shuai, ZHU Ke, DONG Jiankai, et al. Heat transfer performance of deep borehole heat exchanger with different operation modes [J]. Renewable Energy, 2022, 193: 645-656.

[23] JIAYongying, FANG Zhiwen, ZHAO Yaxian, et al. Optimal insulation backfill depth analysis of coaxial deep borehole heat exchanger based on multi-factor orthogonal experiments [J]. Energy and Buildings, 2022, 273: 112414.

[24] GUO Huan, XU Yujie, CHEN Haisheng, et al. Corresponding-point methodology for physical energy storage system analysis and application to compressed air energy storage system [J]. Energy, 2018, 143: 772-784.

[25] HE Xin, WANG Huanran, TAO Feiyue, et al. Performance analysis of constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system considering off-design model of compressor [J]. Energy and Power Engineering, 2021, 13(4B): 11-18.

[26] KHALEGHI S, ASIAEI S, SIAVASHI M. A smart grid poly-generation design for hot arid regions composed of multi-effect distillation (Med), compressed air energy storage (CAES), and parabolic trough solar collector field (PTSC) [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 372: 133693.

[27] YAO Erren, WANG Huanran, LIU Long, et al. A novel constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. Energies, 2015, 8(1): 154-171.

(编辑 武红江)