

DOI: 10.19666/j.rlfed.202411249

热管型深层地热驱动热电联供系统 热力学与热经济分析

李骥飞¹, 饶建业¹, 李瑞忠¹, 郭智琳¹, 苗政²

(1. 电力规划总院有限公司, 北京 100120;

2. 华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206)

[摘要] 建立了热管型深层地热驱动热电联供系统分析模型, 通过热管-地热岩层数值计算获取热管的动态取热特性, 通过耦合直膨式热电联供系统热力学与热经济性能分析, 研究了热管结构(热管直径、热管长度、保温层长度)、运行时间和地温梯度对热电联供系统性能的影响规律。结果表明: 热管蒸汽冷凝温度越低, 热管取热量越大, 有助于缩短投资回收期, 但冷凝温度的降低会降低热电联供系统热效率, 同时, 存在最佳蒸汽冷凝温度使得系统平均度电成本最低。热管取热量在前5年下降较快, 之后逐渐趋于平稳; 为保持系统的长期(30年)稳定取热, 避免相邻热管的干扰, 每2根热管的中心距离应保持在80 m以上, 热电联产系统的经济性与热管结构参数密切相关, 在适宜蒸汽冷凝温度下, 增大热管直径和长度, 选择地温梯度较高的靶区可有效降低热电联供系统投资回收期和平均度电成本。

[关键词] 地热能利用; 热管; 热电联供系统; 投资回收期; 平均度电成本

[引用本文格式] 李骥飞, 饶建业, 李瑞忠, 等. 热管型深层地热驱动热电联供系统热力学与热经济分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 135-144. LI Jifei, RAO Jianye, LI Ruizhong, et al. Thermodynamic and thermo-economic analysis of heat pipe-based deep geothermal driven combined heat and power system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 135-144.

Thermodynamic and thermo-economic analysis of heat pipe-based deep geothermal driven combined heat and power system

LI Jifei¹, RAO Jianye¹, LI Ruizhong¹, GUO Zhilin¹, MIAO Zheng²

(1. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. Beijing Key Laboratory of Multi-phase Flow and Transfer of Low-grade Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An analytical model for a combined heat and power (CHP) system driven by deep geothermal energy based on heat pipes was developed. The dynamic heat extraction characteristics of the heat pipes are obtained through numerical calculations based on the heat pipe-geothermal rock layer model. By analyzing the thermodynamic and thermo-economic performance of the direct expansion CHP system, the effects of heat pipe structure (heat pipe diameter, length, and insulation layer length), operating time, and geothermal temperature gradient on the performance of the system are investigated. The results show that, lower steam condensation temperature of the heat pipes leads to greater heat extraction, which helps shorten the investment recovery of the system. However, reducing the condensation temperature also decreases thermal efficiency of the CHP system. Moreover, there exists an optimal steam condensation temperature that minimizes the system's levelized cost of electricity (LCOE). The heat extraction rate from the heat pipes declines rapidly in the first five years, and then gradually stabilizes. To maintain stable heat extraction over long term (30 years) and avoid interference between adjacent heat pipes, the center distance between any two heat pipes should be kept above 80 meters. The

收稿日期: 2024-11-28 网络首发日期: 2025-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1507303)

Supported by: National Key Research and Development Program (2021YFB1507303)

第一作者简介: 李骥飞(1991), 男, 硕士, 主要研究方向为地热能开发利用技术、地热能发电应用及新能源信息化技术, 273015383@qq.com。

通信作者简介: 苗政(1982), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为有机朗肯循环试验及热力学优化, miaozheng@ncepu.edu.cn。

economic performance of the CHP system is closely related to the structural parameters of the heat pipes. At an optimal steam condensation temperature, increasing the heat pipe diameter and length, and selecting target zones with higher geothermal gradients can effectively reduce both the investment payback period and the LCOE.

Key words: geothermal energy utilization; heat pipe; CHP system; investment payback period; LCOE

社会经济快速发展和能源结构调整使得可再生能源^[1]（包括地热能^[2]、太阳能^[3]、生物质能^[4]等）成为未来能源的发展方向。我国地域辽阔，地热资源丰富，主要分为干热岩和水热 2 种类型。目前，我国地热能开发以水热型的中低温地热直接利用为主^[5]，高温干热岩开发还处于起步阶段^[6]。根据中国地质调查局开展的地热资源调查评价结果可知：我国深层（3~10 km）干热岩资源为 2.5×10^{25} J，折合标准煤约为 856 亿吨^[7]，由于深层干热岩储量丰富、温度高，具有很大的产热和发电潜力^[8-10]。在“碳中和，碳达峰”的背景下，干热岩资源开发利用是促进能源结构调整、节能减排的重要措施^[11-14]。

现有对于干热岩开采利用的技术手段有增强型地热系统（enhanced geothermal systems, EGS）^[15-17]和蒋方明等^[18]提出的超长重力热管系统（SLGHP）。Huang 等人^[19]进行了重力热管的现场试验，并证实了超长重力热管技术的可行性，为深层地热能利用提出一种新颖的技术。Huang 等人^[20]分析了超长重力热管从干热岩中提取热量时关键参数的影响。地热资源种类多样，具体的取热条件可能因资源类型的不同（如干热岩、地热水等）而有所差异。Li 等人^[21]提出了一种基于在井筒连接的多含水层中引起层间横流的超长重力热管取热系统的传热增强策略。Huang 等人^[22]建立了一个以氦为工质，长度为 4 149 m 的超长重力热管系统，该系统有着超过 1 MW 的连续热输出能力，其部分径向热通量达到了 4×10^7 W/m²。Chen 等人^[23]在太原建立了一个超长重力热管和热泵相结合的供暖系统，对不同工况下的实测温度和取热速率进行了测试和分析。Chen 等人^[24]提出了超长重力热管流体工质的筛选准则，并通过数值模拟计算证明了所提出的工质选择准则与实际情况具有较好的一致性。Chen 等人^[25]开展了以水、乙醇和丙酮为工质在 4 种流型下的超长重力热管传热性能和流动特性实验，发现以水为工质的热管更适用于较高热负荷工况。研究发现，来自热管外部的地热地层低传热率是限制超长重力热管取热系统热提取率的一个主要因素。Li 等人^[26]提出了一种新型超长重力热管强化传热系统的概念，它在近井处的热储层裂缝填充了高导热相变材料。Huang 等人^[27]提出了一种水库与热管系统相结合的

系统，为系统优化设计提供了指导。Chen 等人^[28]对超长重力热管取热系统的工作特性进行了理论分析，发现蒸汽的流动阻力为超长重力热管中主要的阻力来源。

地热资源的开发与利用成本较高，尤其是涉及深层地热时，开采成本显著增加。Ma 等人^[29]比较了超长重力热管取热系统与传统井下换热器系统，发现井下换热器系统的平均度电成本显著高于超长重力热管系统。Ma 等人^[30]通过经验公式推导来评估超长重力热管取热系统的发电性能。Meng 等人^[31]研究了 EGS 在利用地热资源下 4 种热电联产系统的性能。Cheng 等人^[32]通过算法优化了地热电联产系统的运行参数，显著提升了系统的发电能力、供热能力和整体效率。Guo 等人^[33]提出了一种基于超临界 CO₂ 朗肯循环的地热型热电联产系统，性能分析结果显示显著提高了系统的热力性能和经济性。

由上述文献梳理可知，热管型深层地热供热系统是一种有效的深层地热利用技术。目前，对于该技术的研究在实验和理论方面还不够深入。本文针对地热资源条件和环境条件存在差异的地区，建立了地热驱动热电联供系统热管型深层地热取热系统与直膨式热电联供系统耦合模型，通过数值计算获得 5~10 km 长度范围的热管取热特性，并给出与热管耦合的直膨式热电联供系统的热力学和热经济性能，为该技术的实际应用提供理论依据。

1 热管取热系统

1.1 热管型深层地热系统

图 1 为热管型深层地热驱动热电联供系统示意。该系统采用直膨式设计，即热管中工质即为透平的做功工质。本文采用水作为工质，通过热管吸收热量，使其在出口处转化为饱和蒸汽。蒸汽推动汽轮机做功，乏汽进入换热器与供暖回路中的水进行换热。本文中供暖回路供水温度 70 °C，回水温度 50 °C，设定换热器夹点温差为 10 °C，因此，汽轮机出口温度限定为 80 °C。乏汽在供热换热器中冷却为液态水后通过水泵加压到热管压力，进入管口换热器，消耗部分蒸汽热量达到热管出口压力下的饱和和液态水状态，继而回流进入热管再次换热。

在热管下部，热管外管壁与干热岩接触，通过热传导从岩层中吸收热量，当热量传递到热管内部时，热管中的水吸收热量并迅速蒸发，变成高温蒸汽；由于蒸汽具有较低的密度且伴随着温度的升高，蒸汽沿着热管内壁由蒸发段上升，该过程会经历一段被保温层包裹的管段，因为保温层的导热系数小，热管中的工质不与外界发生热量交换，这一部分被称为绝热段。

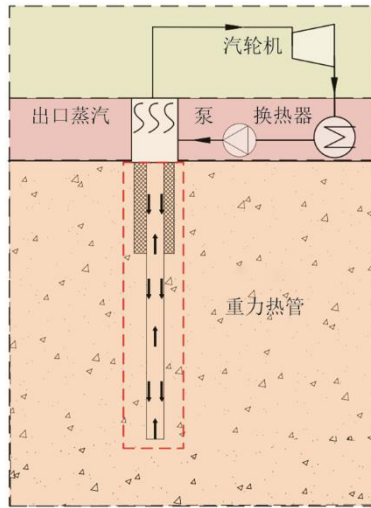


图1 地热驱动的热电联供系统
Fig.1 The geothermal-driven combined heat and power system

1.2 干热岩导热模型

本文通过自编程序建立了热管取热过程的二维热传导模型，模拟了系统运行过程中的干热岩石层温度场变化及其热量提取特性。模型结合了热管内部的复杂流动和传热过程，旨在精确反映系统的热性能表现。其中，重力热管外部岩石传热过程的控制方程为^[15]：

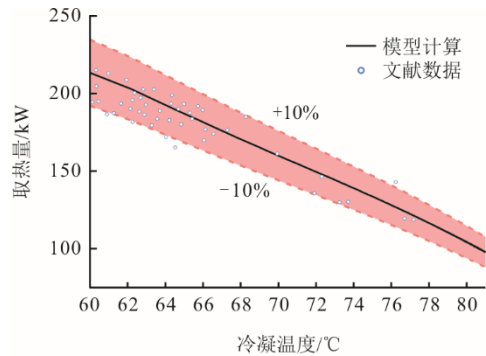
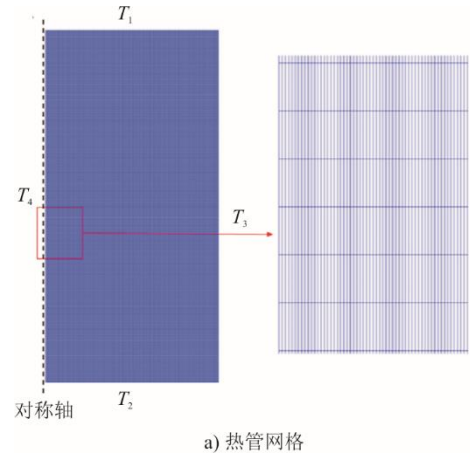
$$\left[\varepsilon \rho_f c_{p,f} + (1-\varepsilon) \rho_s c_{p,s} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \varepsilon \lambda_f + (1-\varepsilon) \lambda_s \quad (2)$$

式中： ε 为孔隙率； ρ 为密度； c_p 为比热容；下标s、f分别为干热岩石层的固体和流体； λ_{eff} 为干热岩的有效导热系数。

在重力热管取热过程中，径向地层中的温度变化较快，特别是在热管与周围岩层的接触区域；相较于径向，轴向上的温度变化相对平缓。因此，通过使用较小的径向网格和较大的轴向网格，可以更精确地捕捉温度分布和热传导过程，并且减少网格数量，降低计算复杂度和计算量，从而提高模拟的准确性。重力热管具有中心对称性，网格划分时将

热管中心的对称轴作为左边界。在网格划分过程中，热管径向以0.5 m的长度进行划分，同时热管轴向以10.0 m的长度进行划分，形成结构化网格。热管网格划分及模型验证如图2所示。



b) 基于文献[19]热管结构的模型计算与现场测试结果

图2 热管网格划分及模型验证
Fig.2 Grid division for the heat pipe and model validation

热管长度为5~10 km，直径为300~600 mm，从热管顶端向下布置了长度为1~3 km的保温层。同时，设置了以热管圆心为中心，半径为100 m，并且在热管底端向下延伸100 m的圆柱形干热岩层为热储层。热管及干热岩层区域的参数设置参考文献[20]，具体的数值计算参数见表1。图2b)为基于参考文献[19]中热管结构获得的模型计算结果与现场测试结果的对比。本模型预测结果与实测结果吻合良好，具有足够的精度用于对热管不同结构下取热性能的预测。

数值计算的地下干热岩层边界条件如下：

1) 上下边界条件采用了定温边界条件，上边界 $T_1=T_g$ ，下边界 $T_2=T_g+\Delta T \cdot L$ ；

2) 圆柱形干热岩层侧面设置为绝热边界条件 $\frac{\partial T_3}{\partial n} = 0$ ；

3) 网格左边界 $T_4 = f(t, y)|_{x=0}$ 。

表 1 数值计算参数

Tab.1 Parameters for numerical calculation

项目	数值
热管长度 L/km	5~10
热管直径 D/mm	300~600
保温层长度 L_{ins}/km	0~3
地表温度 $T_g/^\circ\text{C}$	15
冷凝温度 $T_c/^\circ\text{C}$	70~180
孔隙率 ε	0.01
地温梯度 $\nabla T/(^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1})$	3.5~5.0
岩石密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 650
岩石比热容 $c_p/(\text{J}\cdot(^\circ\text{C}\cdot\text{m}^3)^{-1})$	1 000
岩石热导率 $\lambda_s/(\text{W}\cdot(^\circ\text{C}\cdot\text{m})^{-1})$	2.1
流体热导率 $\lambda_f/(\text{W}\cdot(^\circ\text{C}\cdot\text{m})^{-1})$	0.6
保温层热导率 $\lambda_{\text{ins}}/(\text{W}\cdot(^\circ\text{C}\cdot\text{m})^{-1})$	1
工质	水
运行时间/年	1~30

1.3 热管取热模型

为了满足系统数值计算快速的要求,本研究建立了热管取热系统模型进行以下合理假设:

1) 蒸发过程只发生在热管的整个蒸发段中,且在热管内任意一横截面上的蒸汽变化量与液体变化量相等;

2) 热管内无蒸发抑制及局部干涸现象;

3) 热管内不存在汽-液夹带现象;

4) 蒸汽的冷凝过程温度保持恒定。

重力热管模型的主要控制方程^[20]如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v v_v)}{\partial y} = \frac{q}{h_v - h_f} \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_v v_v)}{\partial t} + \rho_v v_v \frac{\partial(\rho_v v_v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + R_v v_v^2 + \rho_v g \quad (4)$$

能量方程:

$$\left[\varphi \rho_v c_{p,v} + (1-\varphi) \rho_f c_{p,f} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \varphi \rho_v c_{p,v} \frac{\partial(v_v T)}{\partial y} + (1-\varphi) \rho_f c_{p,f} \frac{\partial(v_f T)}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{4\lambda_{\text{surf}}(T_{\text{surf}} - T)}{D\delta_{\text{surf}}} \quad (5)$$

式中: v 为在轴向上速度的分量; q 为蒸汽相变时释放的潜热量; 下标 v 、 f 分别表示气相、液相; δ 为管壁厚度; λ 为热导率; 下标 surf 表示热管管壁处; R_v 为流动阻力。

根据假设热管内任意一横截面上的蒸汽变化量与液体变化量相等可知,任意一横截面上蒸汽的质量通量与液体的质量通量互为相反数:

$$\varphi \rho_v v_v = -(1-\varphi) \rho_f v_f \quad (6)$$

计算流动阻力时,阻力系数 f_g 采用 Swamee 等人^[34]总结的管道流阻的经验公式进行计算:

$$f_g = \begin{cases} \frac{64}{Re}, & Re \leq 2\ 300 \\ 0.002\ 5 Re^{\frac{1}{3}}, & 2\ 300 < Re \leq 4\ 000 \\ \frac{0.25}{\left[\lg\left(\frac{e}{3.7D}\right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right]^2}, & 4\ 000 < Re \leq 1 \times 10^8 \end{cases} \quad (7)$$

式中: e 为管道粗糙度; D 为管道当量直径; Re 为流体的雷诺数。

重力热管内温度和压力需要满足:

$$T = f(p) \quad (8)$$

2 热电联供系统分析模型

2.1 热力学分析模型

由于该系统采用直膨式设计,蒸汽直接推动汽轮机做功,该过程的循环净功 W_{net} 为:

$$W_{\text{net}} = W_t - W_p \quad (9)$$

式中: W_t 为汽轮机做功; W_p 为泵耗功。

系统热效率 η 仅反映系统做功能力,如同时考虑供热换热器中热量的利用,则热电总热效率为 100%。

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{heat}}} \quad (10)$$

$$Q_{\text{heat}} = Q_t + Q_r \quad (11)$$

式中: Q_{heat} 为热管出口蒸汽总热量; Q_t 为进入汽轮机的蒸汽携带的热量; Q_r 为井口换热器用于加热回水的热量。

2.2 热经济性能分析模型

本文选取平均度电成本 (LCOE) 和投资回收期作为经济性能的评估标准,它们分别表明了热电联产系统的日常运营的经济效益和系统回收总投资所需的时间。

LCOE 为^[29]:

$$\text{LCOE} = \frac{C_t \cdot \text{CRF} + C_{\text{op}}}{t_{\text{anul}} \cdot W_{\text{net}}} \quad (12)$$

式中: C_t 为系统总成本; CRF 为投资回收系数; C_{op} 为运行维护成本,按系统总成本的 1.5% 计算; t_{anul}

为年运行时间，取 8 000 h； W_{net} 为发电量。

$$C_t = \sum C_{bm} + C_{SLGHP} + C_{wd} \quad (13)$$

$$C_{SLGHP} = P_s \times L \quad (14)$$

$$C_{wd} = P_d \times L(L + 1\ 000) / 2\ 000 \quad (15)$$

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (16)$$

式中： C_{bm} 为设备成本； C_{SLGHP} 为重力热管成本； P_s 为超长重力热管单位成本，140 美元/m； C_{wd} 为钻井成本； P_d 为钻井单位成本，140 美元/m； i 为有效年利率，取 5%； n 为使用寿命，20 年。

设备成本^[31] C_{bm} 为：

$$C_{bm} = C_p \cdot F_{bm} \quad (17)$$

$$\lg C_p = K_1 + K_2 \cdot \lg(A) + K_3 \cdot [\lg(A)]^2 \quad (18)$$

$$F_{bm} = B_1 + B_2 \cdot F_M \cdot F_p \quad (19)$$

$$\lg F_p = C_1 + C_2 \cdot \lg(P) + C_3 \cdot [\lg(P)]^2 \quad (20)$$

式中： C_p 为采购设备成本； F_{bm} 为设备系数； A 为设备容量或尺寸参数； F_M 为设备材料系数； F_p 为工作压力系数； K_1 、 K_2 、 K_3 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 和 C_3 为常数，设备成本计算相关系数^[31]见表 2。

表 2 设备成本计算相关系数
Tab.2 Correlation coefficients of components cost calculation

设备	系数				
	$K_1/K_2/K_3$	$C_1/C_2/C_3$	B_1/B_2	F_M	F_{bm}
换热器	$K_1=4.324\ 7$	$C_1=0.038\ 81$	$B_1=1.63$	1.35	
	$K_2=-0.303\ 0$	$C_2=-0.112\ 72$	$B_2=1.66$		
	$K_3=0.163\ 4$	$C_3=0.081\ 83$			
汽轮机	$K_1=2.247\ 6$				6.1
	$K_2=1.496\ 5$				
	$K_3=-0.161\ 8$				
泵	$K_1=3.389\ 2$	$C_1=0$	$B_1=1.89$	1.55	
	$K_2=0.053\ 6$	$C_2=0$	$B_2=1.35$		
	$K_3=0.153\ 8$	$C_3=0$			

投资回收期^[35] t_{pp} 为：

$$t_{pp} = \frac{\ln \frac{C_{rev} - C_{op}}{C_{rev} - C_{op} - i \cdot \sum C_{eqp}}}{\ln(1 + i)} \quad (21)$$

$$C_{rev} = W_{net} t_{anul} c_{elec} + Q_{heat} t_{anul} c_{heat} \quad (22)$$

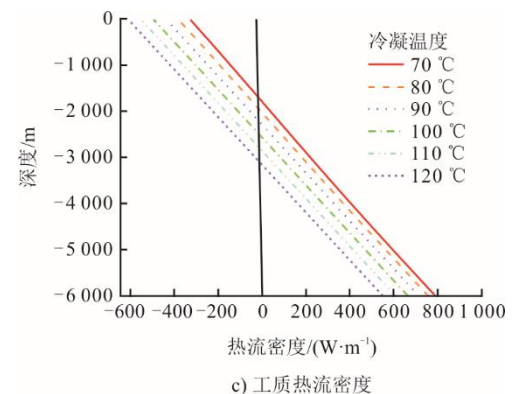
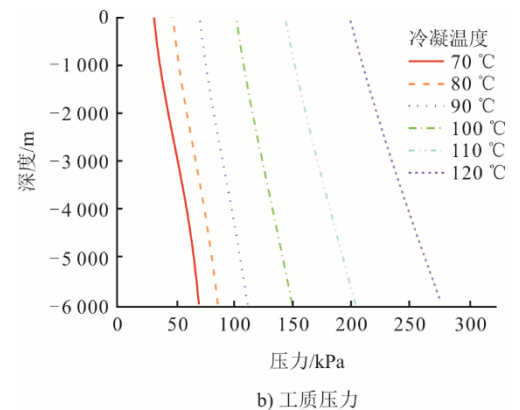
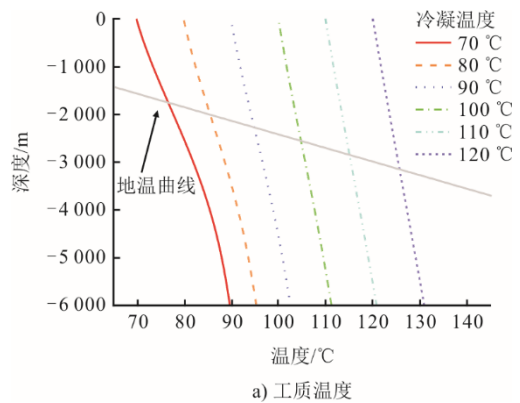
式中： C_{rev} 为电力和供暖的年收入； $\sum C_{eqp}$ 为设备购置的总成本； c_{elec} 为电价，取 0.1 美元/(kW·h)； c_{heat} 为供热价格，取 3 美元/GJ。

3 结果与分析

3.1 热管取热特性分析

图 3 为 6 km 热管在地温梯度 3.5 °C/100 m 下热管轴向温度、压力、质量流量和热流密度分布。随着热管出口蒸汽冷凝温度的降低，热管的平均温度降低，从而增大了热管管壁与干热岩之间的换热温差；并且随着冷凝温度的降低，热管中工质的密度下降，压力随之降低。

从热流密度分布曲线可见，随着冷凝温度的降低，重力热管的散热管段会逐渐缩短，即在 70~120 °C 的冷凝温度下，热管散热管段在 1.5~2.6 km 内变化，其余管段则表现为吸热状态。该热管明显的特征为在 2 km 左右深度需要设置保温层以减小热管散热。



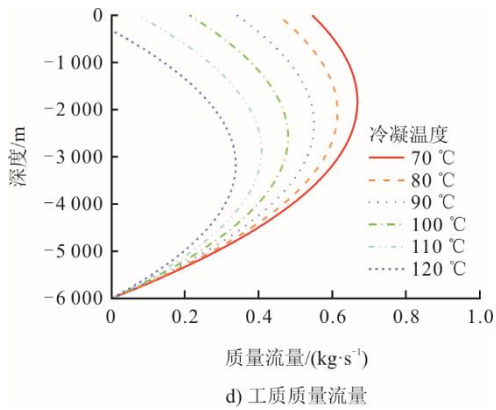


图3 热管运行时工质参数变化曲线
Fig.3 Change curves of working fluid parameters during the heat pipe operation

重力热管中的质量流量呈现先增大后减小的变化规律，其最大质量流量对应的位置会随着冷凝温度的升高逐渐上移。在较低的冷凝温度下，质量流量的减少幅度较小，意味着热管内的流体在较低温度下流动更加均匀。在较高的冷凝温度下，质量流量在轴向上的变化更为剧烈，这表明高温下流体的传热和流动更为活跃，热管内部的流体在更短的距离内完成了更多的热量传递。

3.2 运行时间对热管取热特性的影响

模拟了 6 km 热管在地温梯度 3.5 °C/100 m，出口饱和蒸汽温度为 90 °C 的工况下，运行 30 年干热岩石层的温度分布及取热量变化，研究了运行时间对热管取热特性的影响，结果如图 4 所示，热管运行 30 年取热量变化如图 5 所示。由图 5 可见，随着运行时间的增加，热管取热性能逐渐下降，尤其是在运行初期表现显著。运行前 5 年，热管取热量由 733.37 kW 下降到 601.86 kW，减少了 18%，表明此阶段的衰减较为明显。其原因为热管周围的岩层温度逐渐降低，尤其是靠近热管表面的区域，使热传导驱动力减弱。干热岩中的热传导速率有限，尽管岩层深处仍然保持较高温度，但向热管传输的热量受到热扩散能力的制约，导致供热能力下降。在运行 5~10 年期间，取热量下降趋势明显放缓，仅减少了 5%。这是因为随着时间的推移，热量提取范围逐渐扩大，热管能够从更远的岩层中提取热量，弥补了局部热量衰减的不足。运行 10~30 年期间，取热量进一步趋缓，后 20 年运行期间取热量仅下降了 7%。这一阶段的系统表现趋于稳定，主要得益于热量传输的动态平衡：热管对周围岩石的热量提取范围逐步稳定在半径 40 m 左右。

热管在运行初期对周围岩层的取热效果较为

显著，随着时间的推移，提取热量的区域逐渐扩展，系统取热性能趋于稳定。运行时间在 15~30 年内，热管对周围干热岩的取热范围基本维持在半径 40 m 左右，在距离热管中心 40 m 的位置，温度变化不明显 (0.63 °C/m)，表明系统在长期运行中能够有效从干热岩中提取热量，并在一定范围内保持热量传输的稳定性。当系统需要多个热管作为热源供给时，为了保证系统的长期稳定运行并避免各热管之间的相互影响，每 2 个热管中心距离至少保持 80 m。

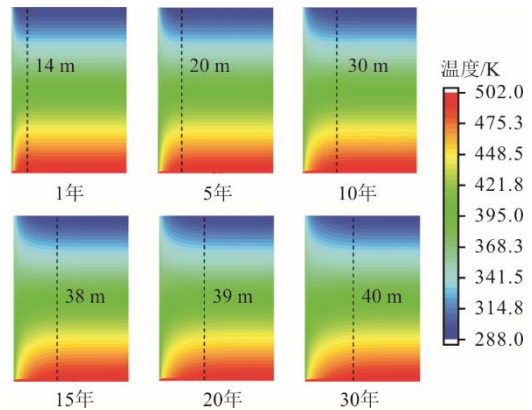


图4 热管运行 30 年干热岩层温度场分布
Fig.4 Temperature field distribution of heat pipe in dry hot rock layer (operation time: 1 to 30 years)

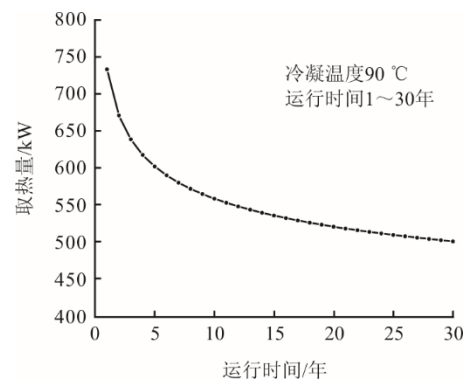


图5 热管运行 30 年取热量变化
Fig.5 Heat extraction variation of the heat pipe (operation time: 1 to 30 years)

3.3 热电联供系统性能分析

由于热管与热电联供系统耦合，热管热质传递过程对热电联供系统性能有着重要影响。本节分析了热管结构参数、地温梯度及保温层长度对热电联供系统性能的影响。

3.3.1 热管直径对系统性能的影响

图 6 为 6 km 热管在不同热管直径对系统性能的影响。由图 6a) 可见：在相同的冷凝温度下，随着热管直径的增大，热管管壁与干热岩石层的接触

面积随着增加，通过热管壁的热量也随之增加；当冷凝温度较低时，热管管径增大使热管取热量增加更为明显，随着冷凝温度的提高，热管管径增大对取热量的影响减弱。当冷凝温度为 70 °C 时，热管直径为 300 mm 的热管取热量为 1 831.63 kW，直径为 600 mm 的热管取热量为 2 586.58 kW，取热量上升约为 41.22%，而当冷凝温度为 120 °C 时，2 种热管直径下的取热量分别为 785.69 kW 和 975.35 kW，取热量的提升仅为 24.14%。同时可以看出，热电联供系统的热效率与热管尺寸无关，而仅与热管出口的蒸汽温度相关。随着进入汽轮机的蒸汽温度升高，热电联供系统的热效率逐渐提高，冷凝温度从 90 °C 提升到 120 °C 时，热效率从 2.18% 提升至 7.86%。

由图 6b) 可以看到，系统投资回收期随冷凝温度整体呈上升趋势，随管径增大略有下降。随着热管出口蒸汽冷凝温度的提高，回收投资所需时间变长，这是由于取热量的减小使得发电和供热量均降低，而系统投资成本不变造成的。

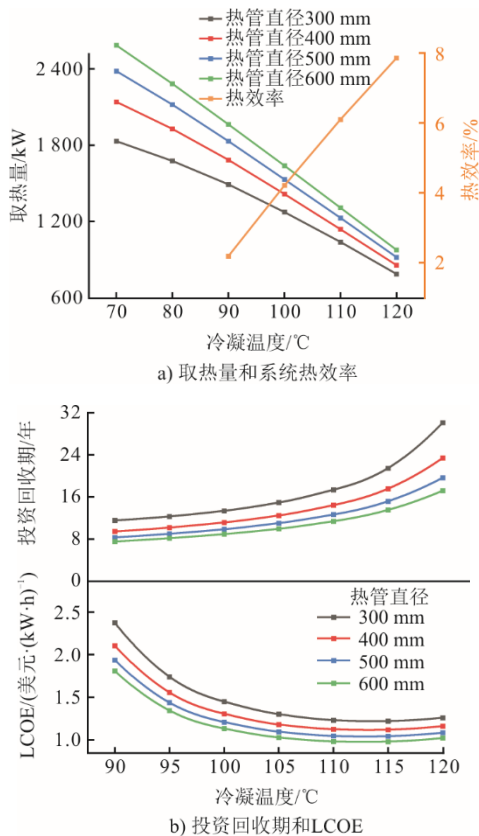


图 6 热管直径对系统性能的影响
Fig.6 The effect of heat pipe diameter on system performance

LCOE 随着蒸汽冷凝温度的增加先快速下降后缓慢升高，在冷凝温度为 110 °C 时各热管直径下的

LCOE 取得最小值，热管直径增大（从 300 mm 到 600 mm），LCOE 略有降低，从 1.23 美元/(kW·h) 降低到 0.98 美元/(kW·h)，表明大管径可以获得更大的取热量，有利于系统发电。

3.3.2 热管长度对系统性能的影响

图 7 为热管长度对取热量和系统性能的影响。

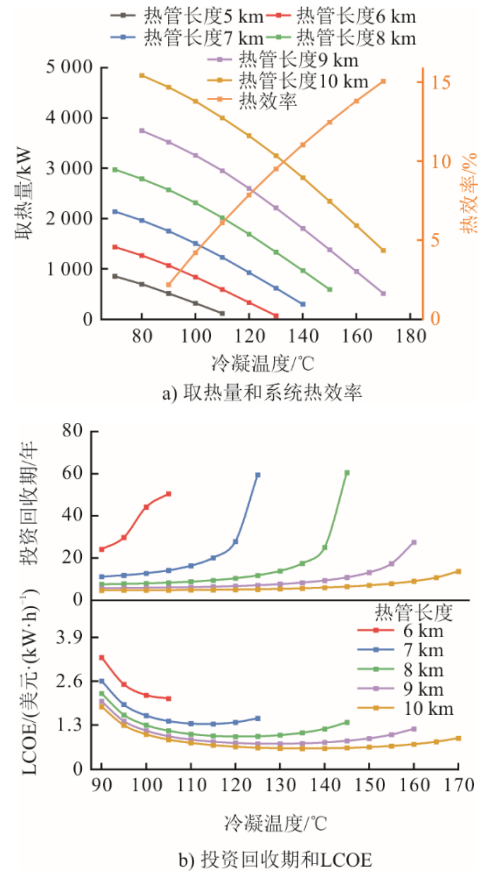


图 7 热管长度对系统性能的影响
Fig.7 The effect of heat pipe length on system performance

由图 7a) 可以看到，随着热管长度的增加，取热量和蒸汽温度均快速增长。这是因为较长的热管不仅具有更大的热传输面积，还可以深入温度更高的地层，从而获得更大的传热温差。当冷凝温度为 80 °C 时，热管长度由 5 km 增加到 10 km 可将取热量由 696 kW 增加到 4 845 kW，增长了 5.96 倍。随着热管长度的增加，更高温蒸汽推动汽轮机做功，系统热效率可从 130 °C 蒸汽对应的 9.49% 增加到 170 °C 蒸汽下的 15.00%。然而，干热岩底层钻井和铺设热管的费用较高，随着热管长度增加，其成本快速增长，因而需要综合考量其热效率和经济性指标。从图 7b) 可以看到，增加热管长度对其经济性指标也有利。投资回收期 and LCOE 均随着热管长度的增加而减小，这得益于热管取热量的迅速增大，

使得热电联供系统的发电和供热容量快速上升,从而获得更多收益。但各热管长度下对蒸汽温度的选取需要平衡 LCOE 和投资回收期 2 个指标。在一定热管长度下,随着蒸汽冷凝温度的上升,投资回收期经缓慢上升后转变为急速上升,而 LCOE 则存在一个最佳冷凝温度。基于图 7 计算结果,推荐以 LCOE 对应的最佳冷凝温度作为热电联供系统的蒸汽温度,此时投资回收期处于相对低位,而热效率处于相对高位。

3.3.3 地温梯度对系统性能的影响

图 8 为不同地温梯度下取热量和系统性能的变化情况。

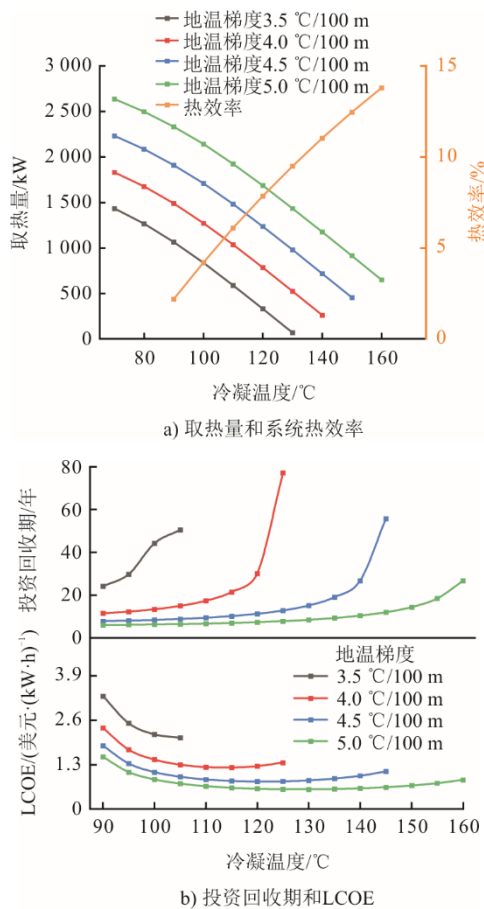


图 8 地温梯度对系统性能的影响
Fig.8 The effect of geothermal gradient on system performance

将 6 km 热管置于地温梯度分别为 3.5、4.0、4.5、5.0 °C/100 m 的条件下,地温梯度对取热量有显著影响。更高的地温梯度对应更高的热源温度,热管驱动力的增加,提升了取热能力。当冷凝温度为 70 °C 时,与 3.5 °C/100 m 地温梯度相比,地温梯度为 4.0、4.5、5.0 °C/100 m 时,取热量分别增加

了 27.69%、55.66% 和 83.85%。同时,随着地温梯度的增加,系统的热经济性显著优化。投资回收期和 LCOE 均呈明显下降趋势。当冷凝温度为 90 °C 时,地温梯度的升高使热电联产系统的投资回收期从 24.1 年缩短至 6.0 年,而平均度电成本则从 3.30 美元/(kW·h)降低至 1.52 美元/(kW·h)。可见,优良的地热靶区条件显著增强了热管型热电联供系统的取热能力,并显著改善了系统的热经济性。

3.3.4 保温层对系统性能的影响

图 9 给出了 6 km 热管在不同保温层长度时系统性能的变化。虚线位置为 2 km 的保温层,此时重力热管的取热量值最大为 1 266.17 kW,其对应热电联产系统的最小平均度电成本和投资回收期,分别为 2.78 美元/(kW·h)、15.7 年。

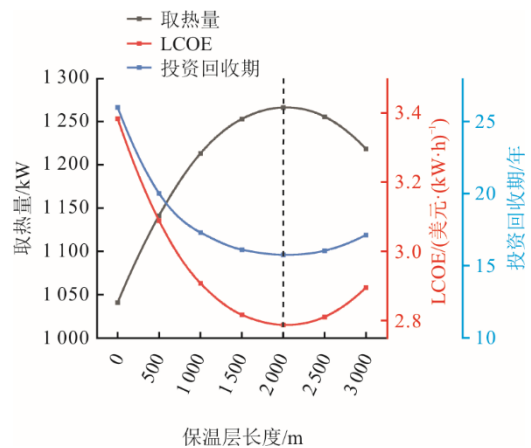


图 9 保温层长度对系统性能的影响
Fig.9 The effect of insulation layer length on system performance

结合图 3a)的热管温度分布可知,当冷凝温度为 80 °C 时,热管内蒸汽温度与干热岩石层温度相等的位置在热管深度 2 km 左右,在该点以上热管温度大于干热岩石层温度。如果保温层长度小于该位置,热管中的热量将在未设置保温层的管段中损失,导致取热量的下降;当保温层长度大于该位置,多余的保温层会阻碍干热岩的热量流入,也会导致取热量的下降。

图 10 为不同保温层长度下的热管热流密度分布。热流密度在热管内蒸汽温度与干热岩石层温度相等的位置时为 0,在其他位置时,保温层过长或过短都会使热流密度产生剧烈的变化,从而影响热管的取热,故在考虑保温层的布置长度时,总会存在一个热管的最佳保温层长度,在保证系统取热量最大的同时提高系统的经济效益。

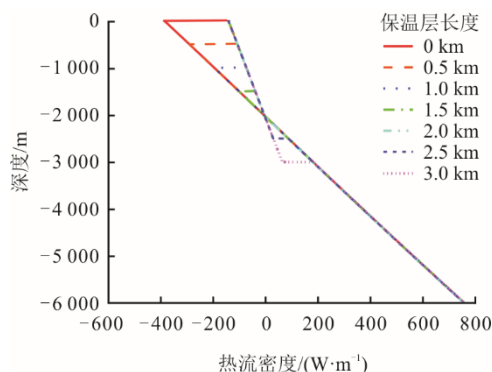


图 10 不同保温层长度下的热管热流密度分布
Fig.10 Distribution of heat flux density with different insulation layer lengths

4 结 论

本文建立了热管型深层地热驱动热电联供系统分析模型,通过热管-地热岩层数值计算获取热管取热特性,耦合直膨式热电联供系统热力学与热经济性能分析,获取了热管结构(热管直径、热管长度、和保温层长度)、运行时间和地温梯度对热管取热特性及热电联供系统性能的影响规律,主要结论如下。

1) 随着热管蒸汽冷凝温度下降,热管内的平均温度下降,增大了与干热岩层之间的换热温差,从而提高了取热量。冷凝温度的降低会降低热电联供系统热效率,但有助于缩短投资回收期,同时存在最佳蒸汽冷凝温度使得系统 LCOE 最低。

2) 热管取热量在其运行的前 5 年下降了 18%,表现出较为明显的衰减趋势,随后逐渐趋于平稳。为保持系统的长期(30 年)稳定取热,避免相邻热管的干扰,每 2 根热管的中心距离应保持在 80 m 以上。

3) 热管的最佳保温层长度应为热管内蒸汽温度与干热岩石层温度相等的位置。根据具体的地热条件,增大热管的直径(300~600 mm)和长度(5~10 km)可以有效提高取热量。同时,地温梯度的升高有助于提供更高的热源温度,从而进一步提升热管的取热量和蒸汽温度。

4) 热电联产系统的经济性表现与热管结构参数密切相关。在适宜蒸汽冷凝温度下,增大热管直径和长度,选择地温梯度较高的靶区可有效降低热电联供系统投资回收期和平均度电成本。

[参 考 文 献]

[1] ELLABBAN O, ABU-RUB H, BLAABJERG F. Renewable energy resources: current status, future

- prospects and their enabling technology[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 748-764.
- [2] ÖZCAN Z, EKICI Ö. A novel working fluid selection and waste heat recovery by an exergoeconomic approach for a geothermally sourced ORC system[J]. *Geothermics*, 2021, 95(1): 102151.
- [3] BRAIMAKIS K, KARELLAS S. Exergetic optimization of double stage organic rankine cycle (ORC)[J]. *Energy*, 2018, 149: 296-313.
- [4] ŚWIERZEWSKI M, KALINA J. Optimisation of biomass-fired cogeneration plants using ORC technology[J]. *Renewable Energy*, 2020, 159: 195-214.
- [5] 马铭, 马峰. 干热岩储层精细地震勘探技术进展综述[J]. *地球物理学进展*, 2025, 40(2): 460-471.
MA Ming, MA Feng. An overview of seismic exploration for hot dry rock reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(2): 460-471.
- [6] 王丹凤, 程剑峰. “双碳”背景下我国干热岩资源勘查技术现状及展望[J]. *中国煤炭地质*, 2023, 35(4): 43-49.
WANG Danfeng, CHENG Jianfeng. China's dry-hot rock resources present situation and prospect of exploration technology under carbon peaking and carbon neutrality background[J]. *Coal Geology of China*, 2023, 35(4): 43-49.
- [7] 罗文强, 马祥县, 唐璐璐, 等. 鲁西南张湾井田 3 煤层煤质特征及成煤环境分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 147-157.
LUO Wenqiang, MA Xiangxian, TANG Lulu, et al. Coal quality characteristics and its coal-forming environment of No.3 coal seams in Zhangwan Minefield, Southwest Shandong Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 147-157.
- [8] LIU H, BAN S, BÉDARD K, et al. Characteristics of Precambrian basement intruded by Cretaceous geological intrusions in Montereian Igneous Province and their impacts on regional thermal structure[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2022, 6(3): 206-220.
- [9] WANG H, JIN X, LIU H, et al. Numerical investigations on the damage evolution in hot dry rocks with natural fractures induced by hydraulic stimulation[J]. *Geothermics*, 2024, 123: 103114.
- [10] XU T, YUAN Y, JIA X, et al. Prospects of power generation from an enhanced geothermal system by water circulation through two horizontal wells: a case study in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *Energy*, 2018, 148: 196-207.
- [11] 周晓江. 内蒙古东胜煤田 WDH 研究区煤层赋存特征及资源评价研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020: 1.
ZHOU Xiaojiang. Occurrence characteristics of coal seam and resource evaluation in WDH research area of Dongsheng Coalfield, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020: 1.
- [12] FENG Y, CHEN X, XU X F. Current status and potentials of enhanced geothermal system in China: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 214-323.
- [13] LI J, SUN Z, ZHANG Y, et al. Investigations of heat extraction for water and CO₂ flow based on the rough-walled discrete fracture network[J]. *Energy*, 2019, 189: 116184.
- [14] DE MOEL M, BACH P M, BOUAZZA A, et al. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia[J]. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews, 2010, 14(9): 2683-2696.
- [15] GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS)[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(7/8): 502-516.
- [16] EGERT R, KORZANI M G, HELD S, et al. Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments[J]. *Geothermics*, 2020, 84: 101749.
- [17] PARKER R. The rosemanowes HDR project 1983-1991[J]. *Geothermics*, 1999, 28(4/5): 603-615.
- [18] 蒋方明, 黄文博, 曹文灵. 干热岩热能的热管开采方案及其技术可行性研究[J]. *新能源进展*, 2017, 5(6): 426-434.
JIANG Fangming, HUANG Wenbo, CAO Wenjiong. Mining hot dry rock geothermal energy by heat pipe: conceptual design and technical feasibility study[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2017, 5(6): 426-434.
- [19] HUANG W, CEN J, CHEN J, et al. Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: a field test [J]. *Energy*, 2022, 247: 123492.
- [20] HUANG W, CHEN J, CEN J, et al. Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: effect of key parameters[J]. *Energy*, 2022, 248: 123527.
- [21] LI Z, GUO J, HUANG W, et al. Heat extraction performance of the super-long gravity heat pipe applied to geothermal reservoirs of multi-aquifers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 225: 125440.
- [22] HUANG W, CHEN J, MA Q, et al. Developing kilometers-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(13): 4508-4518.
- [23] CHEN J, LI Z, HUANG W, et al. Super-long gravity heat pipe geothermal space heating system: a practical case in Taiyuan, China[J]. *Energy*, 2024, 299: 131521.
- [24] CHEN J, HUANG W, CEN J, et al. Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: selection of working fluid[J]. *Energy*, 2022, 255: 124531.
- [25] CHEN J, CEN J, HUANG W, et al. Multiphase flow and heat transfer characteristics of an extra-long gravity-assisted heat pipe: an experimental study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120564.
- [26] LI Z, HUANG W, CHEN J, et al. An enhanced super-long gravity heat pipe geothermal system: conceptual design and numerical study[J]. *Energy*, 2023, 267: 126524.
- [27] HUANG W, CAO W, JIANG F. A novel single-well geothermal system for hot dry rock geothermal energy exploitation[J]. *Energy*, 2018, 162: 630-644.
- [28] CHEN J, HUANG W, CEN J, et al. Operational characteristics of the super-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121530.
- [29] MA Q, HUANG W, CHEN J, et al. Thermodynamic and economic performance of super-long gravity heat pipe geothermal power plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123115.
- [30] MA Q, CHEN J, HUANG W, et al. Power generation analysis of super-long gravity heat pipe geothermal systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 242: 112533.
- [31] MENG N, LI T, JIA Y, et al. Techno-economic performance comparison of enhanced geothermal system with typical cycle configurations for combined heating and power[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112409.
- [32] CHENG F, ABED A M, SINGH P K, et al. Heat energy utilization of a double-flash geothermal source efficiently for heating/electricity supply through particle swarm optimization method[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105343.
- [33] GUO Y, GUO X, WANG J, et al. Comprehensive analysis and optimization for a novel combined heating and power system based on self-condensing transcritical CO₂ Rankine cycle driven by geothermal energy from thermodynamic, exergoeconomic and exergo-environmental aspects[J]. *Energy*, 2024, 300: 131581.
- [34] SWAMEE P K, JAIN A K. Explicit equations for pipe-flow problems [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1976, 102(5): 657-664.
- [35] WANG J, WU Y, LIU X. Thermodynamic and economic analysis of a Kalina cycle-based combined heating and power system for low-temperature heat source utilization [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 55: 102904.

(责任编辑 杨嘉蕾)