

地 热 能 (双月发行) 主 编：王贵玲 副主编：朱家玲 马 岩 张 薇 责 编：李 曼 主办单位 中国地质科学院水文地 质环境地质研究所 天津大学	目 次 2025年第5期
	学述论文 山东省地热资源赋存规律及其富集机制(前半部) 康凤新等 (3) 超长重力热管联合热泵的地热利用系统热力经济性分析 蔺维杰等 (20) 综 述 地下含水层储能应用争议:如何划定管控红线? 地热知光年 (27) 报 导 全球十大地热电站项目介绍 (29) 获国家科技重大专项和国际大陆钻探计划支持渭河盆地万米深钻计 划启动 中国可再生能源学会地热专委会 报 (32)
	(内部资料)

GEOTHERMAL ENERGY

Editor-in-Chief:

Wang Guiling

Editor-in-Chief:

Zhu Jialing

Ma Yan

Zhang Wei

Duty Editor:

Li Man

Organizer

Institute of Hydrogeology
and Environmental Geol -
ogy, Chinese Academy of
Geological Sciences

Tianjin University

CONTENTS

No.5 2025

Academic Articles

The occurrence law and enrichment mechanism of geothermal resources
in Shandong Province (first half)

..... Fengxin Kang et al. (3)

Thermal economic analysis of geothermal utilization system with an ul -
tra-long gravity heat pipe combined with a heat pump

.....Weijie Lin et al. (20)

Review Articles

Controversy over the application of underground aquifer energy storage:
how to define the control red lines?

..... Dire guangnian. (27)

News

Introduction to the top 10 geothermal power station projects in the world

..... (29)

Supported by the national science and technology major project and the
international continental drilling program, the 10000-meter deep drilling
plan for the Weihe Basin was launched

..... Geothermal Energy Professional Committee of CRES (32)

山东省地热资源赋存规律及其富集机制

康凤新^{1,2}, 郑婷婷³, 史猛⁴, 隋海波⁵, 徐蒙⁶, 江海洋⁶, 钟振楠⁷, 秦鹏⁸, 张保建^{9,*}, 赵季初^{2,10,*}, 马哲民³, 崔洋⁵, 李嘉龙^{1,2}, 段晓飞^{2,10}, 白通^{2,10}, 张平平^{2,11}, 姚松⁵, 刘肖³, 史启鹏³, 王学鹏^{2,10}, 杨海涛^{1,2}, 陈京鹏^{2,10}, 刘琲琲⁶

- 1 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266592
- 2 山东省地热清洁能源重点实验室, 山东 济宁 272000
- 3 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 济宁 272100
- 4 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004
- 5 山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队), 山东 济南 250014
- 6 山东省第一地质矿产勘察院, 山东 济南 250102
- 7 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209
- 8 山东省国土空间生态修复中心, 山东 济南 250014
- 9 中国地质科学院, 北京 100037
- 10 山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253072
- 11 天津华北地质勘查总院, 天津 300170

摘 要:中国已发现的150℃以上的高温地热资源及其成因机制研究集中分布在地中海—喜马拉雅地热带

的西藏南部和云南、四川西部,环太平洋地热带

的台湾省。近年来,华北中东部高温地热资源探测取得突破:2019年在河北省马头营3965m深钻获了151℃的高温花岗岩干热岩体,2020年在山西省天镇县1586m深钻获167℃的高温片麻岩裂隙热储地热流体,2023年在山东省东营市桩西地区4283m深钻获167.5℃的高温碳酸盐岩溶热储;因此,亟需对华北中东部高温地热资源成因机制进行系统研究。本文以

上述高温地热田为例,分析华北克拉通破坏、壳幔热物质上涌对地壳浅部高温热异常作用的动力学过程,结合地球物理、地球化学和钻探成果,阐明深部地球动力地质作用对地壳浅部高温地温场的塑造和高温热异常制约机制,揭示深部高温热源机制及其上涌通道,形成深部高温热源及其上涌通道和热能聚集构造部位识别技术;阐释典型地段高温地热资源成因机制及其对华北中东部高温地热探测的示范意义。(1)在印欧板块碰撞的远场效应和西太平洋板块俯冲回撤作用下,华北克拉通破坏造成岩石圈减薄、软流圈上涌和热侵蚀、伸展断陷盆地及深大走滑断裂发育等深部地球动力作用,是幔源热物质上涌至地壳浅部的主要驱动力。(2)高导低速体、地球化学证据和高温地热资源分布形成了良好的对应关系,认为幔源热物质向上侵入引起了浅层热异常,为高温地热形成提供了稳定热源;岩石圈构造薄弱带如板块边缘带和切入岩石圈的深大走滑断裂构成了幔源热物质向上侵入的主要通道。(3)凹凸相间的构造格局和地下水流场主导了地壳浅部的热量分布,在浅部岩石热导率差异驱动形成的“热折射”效应下,热流由凹陷区向凸起区聚集,形成古潜山高温热异常。

关键词:深部地球动力;幔源热;上涌通道;聚热;高温热储;华北板块

引言

山东省地热资源类型多、分布广,资源储量丰富,开采回灌条件好,全省16地市均已成功钻获地热井,发现了大中型地热田。截至2023年底,全省共发现97个地热田:鲁东地热区16个,沂沭断裂带地热区9个,鲁西隆起地热区35个,鲁西北拗陷地热区37个;其中邹平安山岩裂隙热储地热田为2023年最新发现的开放式对流型地热田。全省共钻获各类地热井2152眼,其中正在使用的开采

井1000眼,回灌井800眼左右,地热供暖面积约7000万 m^2 。

沂沭断裂带(郯庐断裂带山东段)、兰聊断裂带(兰聊—盐山断裂带山东段,亦称聊考断裂带)、齐广断裂带等三大断裂带将山东省划分为鲁东隆起、鲁西隆起和鲁西北拗陷三大构造单元。同时,也控制了山东省的热储分布、地温场特征、大地热流分布规律、热源机制和地热资源赋存规律及其富集机制(图1)。

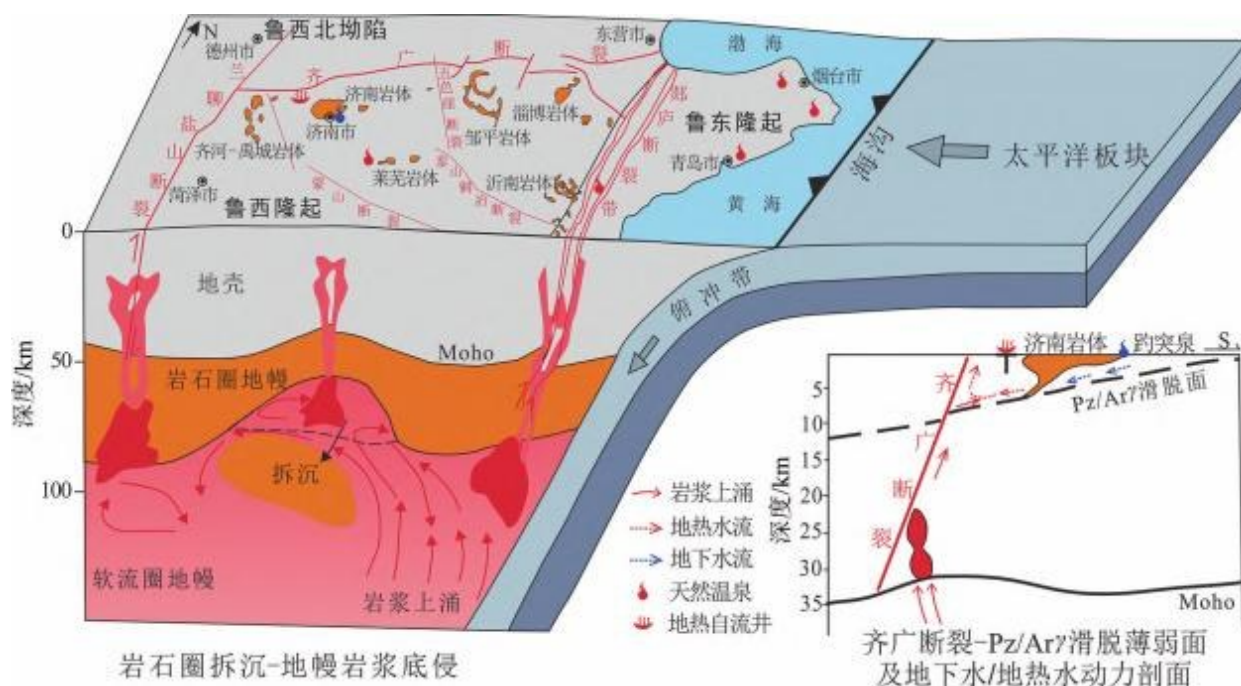


图1 华北克拉通破坏致东部地壳和岩石圈减薄/岩浆沿郯庐断裂和齐广断裂带上侵/地热水形成的动力学过程

根据空间展布形态,将山东省热储类型分为层状热储和带状热储两大类。康凤新依据所处的地质构造环境和热储分布特征,以沂沭断裂带东支—昌邑—大店断裂、沂沭断裂带西支—郯郯—葛沟断裂、齐广断裂和兰聊断裂为界,将山东省自东向西划分为4个地热区:鲁东隆起地热区(I)、沂沭断裂带地热区(II)、鲁西隆起地热区(III)和鲁西北拗陷地热区(IV)。其中,鲁西隆起地热区以山区和平原区界线进一步划分为鲁中南隆起地热亚区(III₁)和鲁中南隆起北缘及鲁西南潜隆地热亚区(III₂)(图2)。

康凤新计算评价全省中深层地热资源量为

$1.21 \times 10^{21} \text{J}$,折合标准煤413亿t。120天供暖期自然条件下地热水可采资源量为3275万 m^3/d 。按照“同层等量回灌、取热不耗水、采灌均衡”的可持续循环开采模式,120天供暖期采灌均衡条件下地热水可采资源量为4798万 m^3/d ,可利用热量为 $1.73 \times 10^{18} \text{J/a}$,折合标准煤5894万t/a,可供暖面积29亿 m^2/a 。120天供暖期现状实际开采量为108万 m^3/d ,开采潜力为4690万 m^3/d 。

1 地热资源赋存特征

根据热源、水源及其运移,热储和盖层等形成地热能富集区的5要素,简要阐释四大地热区的地

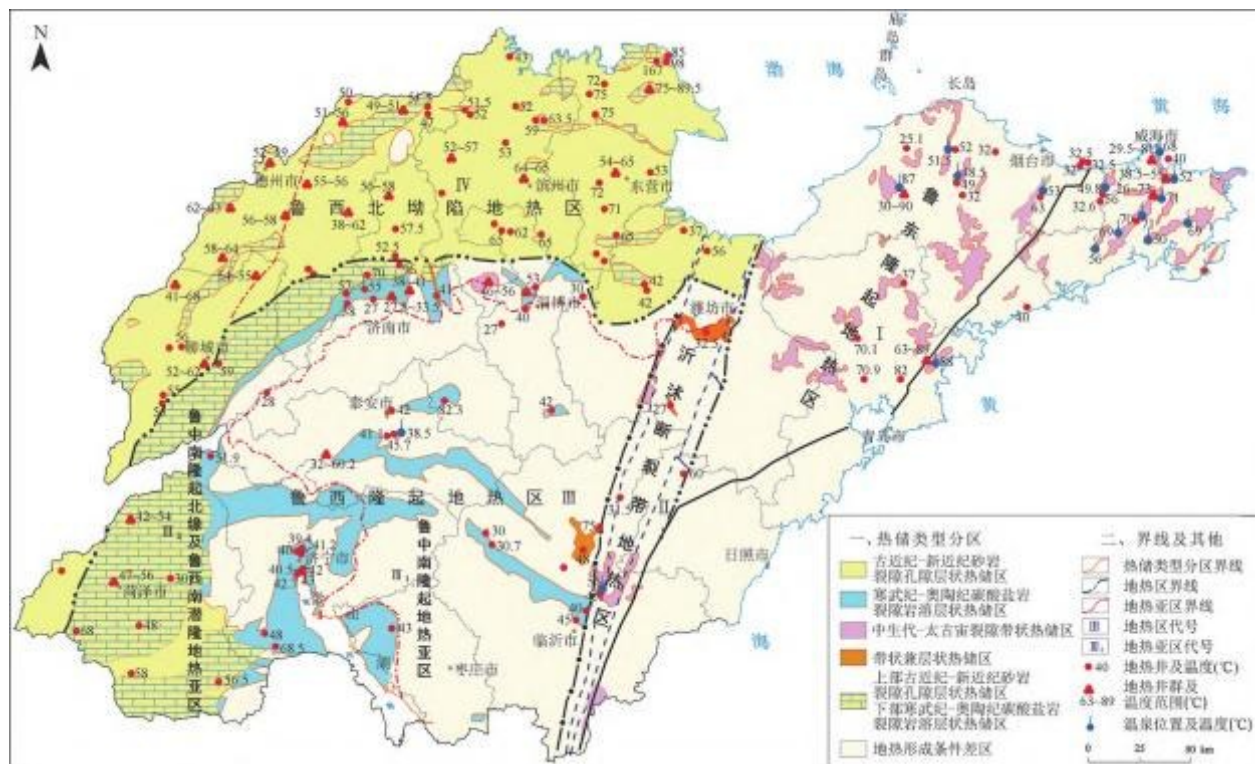


图2 山东省地热资源分区及热储分布图

热资源赋存特征。

1.1 鲁东隆起地热区 (I)

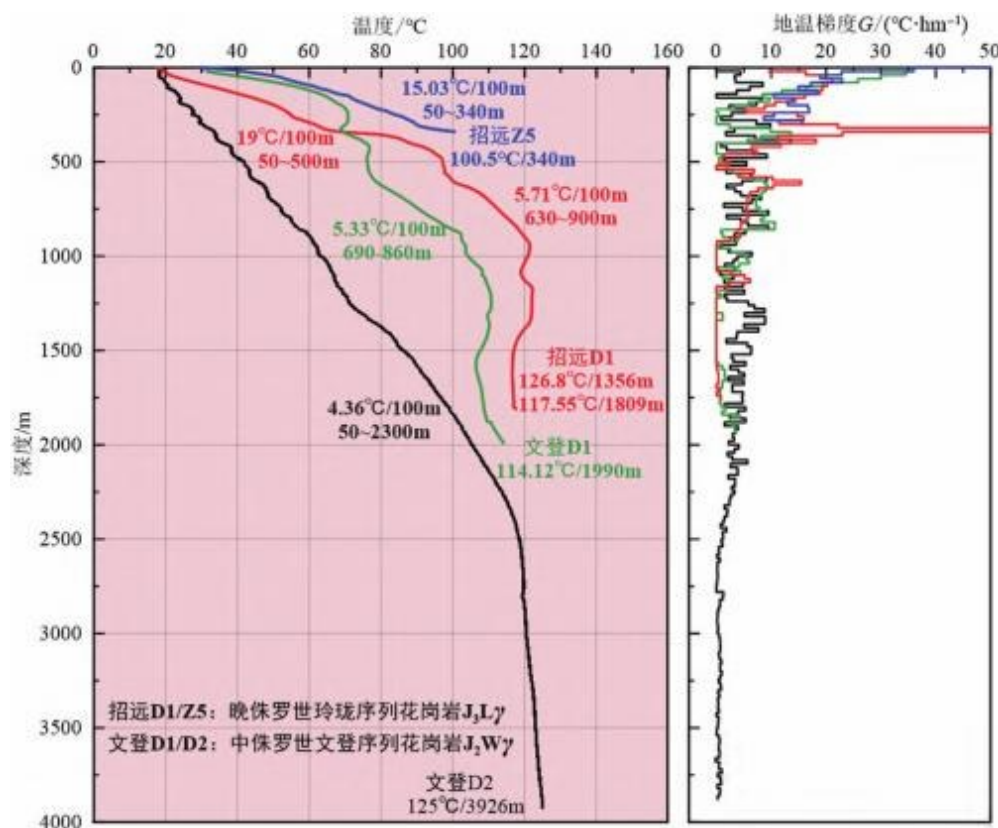
1.1.1 源运储盖特征

如图1所示,鲁东隆起地热区即胶东半岛位于华北克拉通东缘,分布于昌邑一大店断裂以东,行政辖区包括烟台、威海、青岛、日照等市,由三级构造单元胶北隆起、胶莱盆地和胶南威海隆起组成。大地构造上属于华北克拉通与扬子克拉通的结合部位。在西太平洋板块俯冲驱动下,华北克拉通破坏、岩石圈拆沉、减薄及其诱发的软流圈地幔上涌和岩浆上侵与热侵蚀,导致华北东部陆块的岩石圈和地壳厚度大幅减薄,分别减薄至60~80km和<35km,明显小于西部陆块岩石圈(厚达200km)和地壳(厚约45km)厚度(图1)。变薄的岩石圈被上涌的高温软流圈加热,导致地幔热流的显著增加,并伴随温泉、新生代岩浆活动、活动断层和地震的发育。因此,鲁东隆起地热区高热流值的热源大部分来自岩石圈底部。

岩石圈底部的深部高温热能沿深大断裂或侵入岩体与围岩接触带的上涌对流传热为鲁东隆起

地热区的主要热源。如:位于胶北隆起招远东汤温泉120°方向、350m远的D1钻孔,孔深2000m;深50~500m层段、630~900m层段温度随深度平稳线性增加,热量传递以热传导方式为主,地温梯度分别为19℃/100m和5.71℃/100m。630~900m层段是900m深进入对流传热层段以浅地温梯度最小的传导层段(图3),高地温梯度是其下部传导热流和对流热流共同加热作用的结果响应,可以代表该孔的地表热流通量。实测该钻孔侏罗纪花岗岩的热导率平均值为3.5W/(m·K),则热流通量为199.85mW/m²。其中大地热流值即传导分量为78.6mW/m²,则其对流热流分量为121.25mW/m²,占热流通量的61%,指示深部对流热为招远东汤温泉地热系统热能的主要热源。

鲁东隆起地热区分布天然温泉16处,温泉的出露主要受断裂构造和岩浆侵入岩体控制,主要分布于以栖霞复背斜为代表的胶北隆起和以胶南—威海复背斜为代表的胶南—威海隆起花岗岩等酸性岩体断裂交汇处及其与围岩的侵入接触带,皆出露于复背斜核部的NNE或NE向压扭性断



文登 D2—钻孔编号;4.36°C/100 m—地温梯度;50~2300m—测温深度范围;125.00°C/3926m—温度/测温深度。

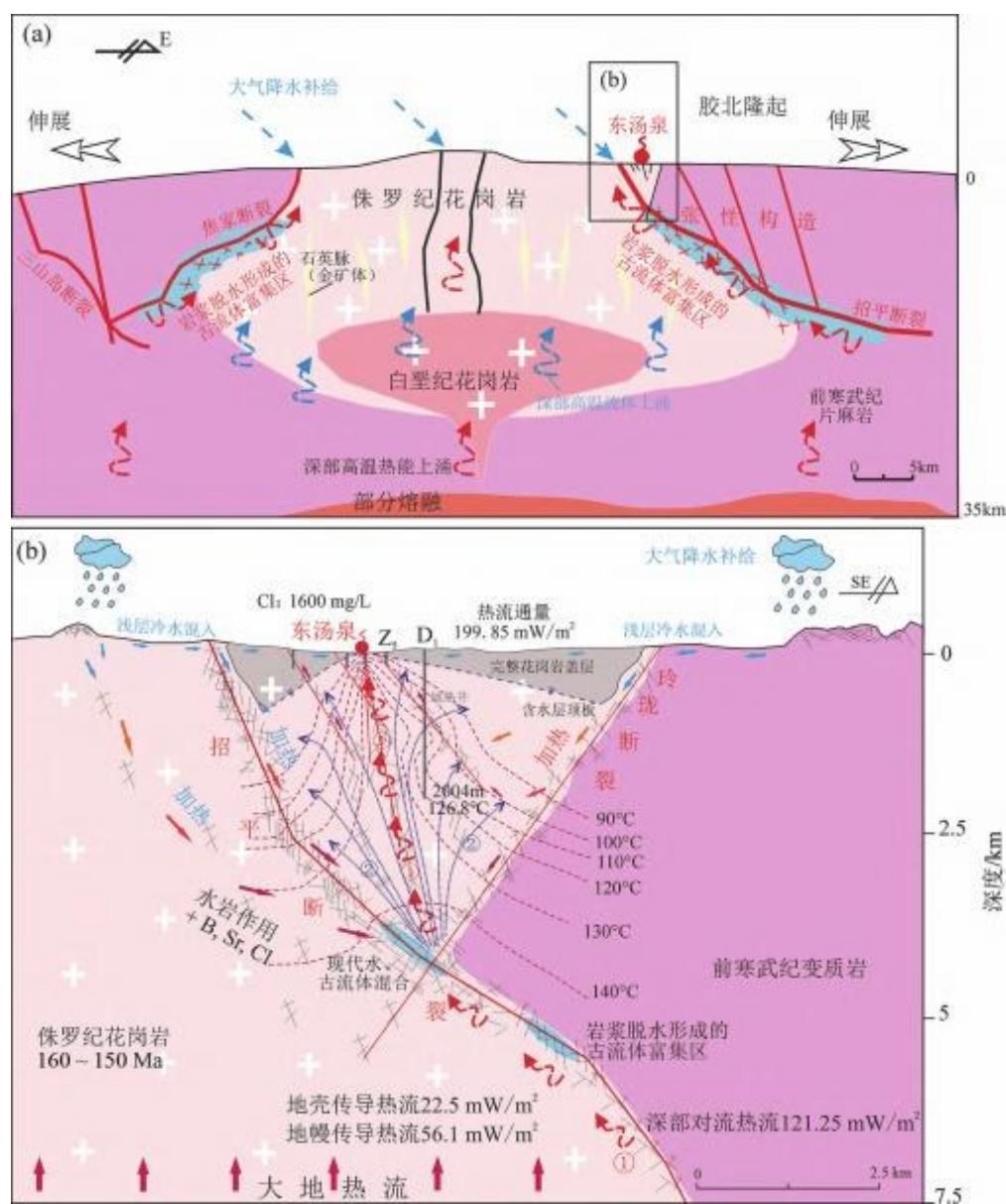
图3 鲁东隆起地热区胶北隆起招远东汤温泉地热系统D1孔/Z5孔与胶南—威海隆起文登洪水岚汤地热系统D1孔/D2孔测温曲线与地温梯度曲线

裂与NNW或NW向张性断裂交会处。多组断裂的交会复合部位裂隙发育,岩石破碎,构成花岗岩裂隙热储,仅即墨东温汤热储岩性为砂岩,热储以温泉为中心呈线(带)状沿NE向深大导热断裂带展布。垂向上受NE向深大导热断裂和NW向导水断裂控制,空间形态受控于断裂倾向与走向,呈腔管状分布(图4)。

花岗岩热储岩体质地脆硬、裂隙发育。NE向深大导热断裂和NW向导水断裂交汇处或侵入岩体与围岩接触带,应力集中、岩石最为破碎,裂隙尤为发育,地下水循环交替条件好、渗透性强。大气降水在补给山区入渗形成地下水,在重力势能和静水压力驱动下,沿深大断裂或侵入岩体与围岩接触带向地势低洼的山间盆地排泄区运移,同时汇聚周边裂隙不发育地区的地下水,运移至强渗透、高裂隙率的断裂交汇处或侵入岩体与围岩接触带时,形成强渗透性、高裂隙率地热水富集

带,上涌压力增高,在地表浅部花岗岩裂隙密集发育的地形低洼处即静水压力最小处,地热水得以压力释放,涌出地表成天然温泉。

天然条件下,天然温泉流量稳定,介于100~1000m³/d,该流量未包括溢流扩散至浅层花岗岩裂隙和第四系孔隙冷水含水层中的地热水。目前仅文登呼雷汤、文登大英汤、牟平于家汤、乳山兴村汤、蓬莱温石汤和旧店地热系统仍可自流,其余地热系统由于在温泉出露处施工了多眼地热井,单井涌水量328~2880m³/d,伴随着开采量的增加和水位的降低均不再自流,地热井水位埋深多在5~35m;水温大部在50~92°C(招3孔),矿化度0.40(牟平于家汤)~17.35g/L(威海宝泉汤),水化学类型主要为Cl-Na、Cl·SO₄-Na或HCO₃·SO₄-Na型。天然流量或地热井开采量的稳定,以及水位和水温的稳定指示鲁东天然温泉属于水热开放地热系统。



a—地热水与深大断裂和热能上涌的区域构造背景；b—现代水、古流体及其混合和水岩相互作用概念模型，以及根据钻孔测温数据绘制的温度等值线图；D1位于东汤温泉120°方向、350m远地热钻孔，孔深2004.66m，121.5℃/951m深，1356m深探获孔内最高温度126.8℃；Z5位于东汤温泉80°方向、150m远地热钻孔，100.5℃/340m深；①断裂交汇复合破碎带对流热流密集和地热水流富集带，温度高，富水性强；②—热流和水流扩散带，温度和富水性逐渐降低。

图4 鲁东隆起地热带胶北隆起招远东汤温泉开放式地热系统水源热源及其富集机制图(据文献修改)

地热田第四系松散沉积层较薄，一般小于30m，保温性能较差。近地表裂隙不发育的完整花岗岩是良好盖层，在其下伏热储地热流体加热下，形成高地温梯度。如招远东汤温泉地热系统Z1孔在揭露热储之前的50~500m深处，地温梯度高达19℃/100m，其驱动机制为：地热流体在沿强渗透断裂裂隙发育带上涌途中，遇完整花岗岩受阻，承

压富集于其底部，构成其加热热源，驱动高热导率的完整花岗岩盖层形成高地温梯度，是非地热异常区的2~10倍(图3)。

1.1.2 典型地热系统

招远市东汤温泉地热系统位于招远市城区，温泉出露于晚侏罗世燕山期玲珑序列侵入岩大庄子单元花岗岩与前寒武纪片麻岩接触带附近。区

域构造上,东汤温泉地热系统位于胶北隆起区栖霞复背斜,地壳受到强烈的拉张、伸展作用从而产生强烈的脆性张裂变形,深部地幔热流沿脆性张裂隙上涌,富集于浅部张性构造带。地幔热流上涌时在不同的压力、水文地质条件下,与围岩发生程度不一的水岩反应,金矿体和高温古流体在张性构造带富集。东汤温泉地热系统以西约2km为金矿控矿构造招平断裂,也是沟通深部地壳和上地幔高温热流的控热断裂;以东约2km为玲珑断裂带,是东汤温泉地热系统的主要导水断裂。两条断裂倾向相向,在3.8km深处交汇。地热田中心还发育一条东西向断裂,3条断裂交汇复合处,岩石破碎程度最高,裂隙最发育,渗透性最强,裂隙率孔隙度最高,温泉即出露于该3条断裂交汇复合形成的破碎带(图4)。沿招平断裂向上传递的深部高温热流和沿玲珑等断裂深循环运移的地热流体在此汇集,形成热流密集和水流富集带,构成地热田的聚热富水中心(图4①)。热流和水流上涌途中,逐渐向外围扩散(图4②),温度、水量呈逐渐降低趋势。

按照氢氧同位素的高程效应原理, δD 值随着地下水补给高程的增大而减小。根据东汤地热田地热流体 δD 值变化计算地热流体的补给高程为314~414m,主要补给区位于招远城区东北部双顶山区域,距离地热田约15km。招平断裂与玲珑断裂在双顶山交汇,大气降水在双顶山区域沿基岩裂隙下渗形成的地下水,在水头压力作用下沿张性断裂和裂隙向深部运移,并向西南方向径流,汇聚于招平断裂与玲珑断裂交汇破碎带,最大循环运移深度为3.8km。地下水在深循环运移途中通过热传导汲取沿途岩体中的热量,与残留高温古流体混合而被高温热能加热,形成相对高温水热环境。水岩相互作用形成富集B、Sr和Cl等离子体的地热流体。在冷热水密度差和补排区静水压力差双重驱动下通过水热对流形成自然上升流,最终在河谷等静水压力最小的地形低洼处出露成泉。

地热田地表覆盖第四系较薄,厚度仅6~7m,最厚处12m,不足以起到保温盖层作用,地热水穿过该层于地表成泉,故以往研究认为这种第四系薄的花岗岩裂隙温泉出露区不存在盖层。而测温曲

线显示(图3,4),热储顶部裂隙不发育的完整花岗岩为阻热盖层,厚度呈穹窿状,地热田中心部位薄仅10m左右,向四周逐渐变厚(图4)。据10余眼地热井测温资料,揭露富水断裂热储前,完整花岗岩传导段地温梯度 $5.7\sim 19^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,平均值为 $14.37^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

据1973年勘探资料,钻孔均承压自流,涌水深度即含水层顶板埋深自泉区向四周逐渐增大(图4),温度、涌水量和矿化度自泉区向四周则逐渐降低。地热田中心温泉出露区即断裂交汇复合处,应力集中,岩体破碎,形成强渗透带。天然温泉出露区水温最高,水量最大,矿化度最高,泉区中心尤甚。位于泉区的招3孔井口水温 92°C ,降深14.6m时涌水量达 $108\text{m}^3/\text{h}$,矿化度 $5.3\text{g}/\text{L}$;Z5孔 81°C (340m孔底温度 100.5°C);招4孔 75°C (图4)。地热田外围抽水井口水温降至 $44\sim 64^{\circ}\text{C}$,涌水量降至 $17.6\sim 62\text{m}^3/\text{h}$,矿化度降至 $1.36\sim 4\text{g}/\text{L}$ 。温度场、涌水量和矿化度分布规律均指示深大断裂交汇复合处既为深部高温热能上涌通道—热流密集,也是深部地热流体上涌通道—水量丰富,水岩反应强烈,矿化度高(图4)。

根据尚未大规模开采、处于天然状态的1960—1972年动态监测资料,东汤温泉的天然流量为 $383.36\text{m}^3/\text{d}$,未包括溢流至第四系松散沉积层的流量。温泉最高水头和流量最高值出现在9月份,最低值出现在1—2月份,受大气降水影响明显,最高水头、最大流量一般较大气降水峰值滞后1个月。最高水温出现于7—9月,最低水温出现于12月和来年的1月。钻孔的自流高度即承压水头高出地面 3.27 (RSK3孔) $\sim 4.57\text{m}$ (招6孔),平均为 3.92m ;单位降深自流涌水量为

$$q=97.82\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$$

预测控制最大地热水位降深 S_{max} 不超过 33.92m ,即平均水位埋深 D 在 30m 以浅时的地热水可持续开采量 Q_s 为

$$Q_s=qS_{\text{max}}=3318\text{m}^3/\text{d}(D\leq 30\text{m})$$

经过50年的开采,地热井已不再自流,水位动态主要受开采量的控制。在开采旺季(11月至来年4月)洗浴高峰期,开采量为 $3900\sim 4600\text{m}^3/\text{d}$,水位降深较大,埋深在 $34.10\sim 46.20\text{m}$,平均 36m 左

右,能够保持动态相对稳定;在开采淡季(5—10月),开采量降至1264~1770m³/d,水位恢复明显,埋深升至3.50~8.75m,平均6m左右(R7观测孔),开采量小的年份可自流,井口水温80~90℃,基本保持稳定。

由于水位下降截取了温泉流量与溢流至浅部花岗岩裂隙和第四系孔隙冷水含水层的地热量,即开采引起的天然排泄量的减少量为 ΔD_0 ,且激发了地热水深循环运移补给增量 ΔR_0 ,从而能够保持降低了的、新的水位埋深条件下(34.10~46.20m)的地热水动力场和补排量动态平衡:

$$QS=\Delta R_0+\Delta D_0+dV/dt$$

式中: Q_s 为地热水可持续开采量 V ; ΔR_0 为水位下降激发的地热水深循环运移补给增量(以下简称“补给增量”); ΔD_0 为开采引起的减少的天然排泄量,即温泉流量和溢流至浅部花岗岩裂隙及第四系孔隙冷水含水层的地热量之和(以下简称“排泄减量”); dV/dt 为过渡性储存量消耗量。

在新的地热水流动力场状态下,要实现地热水的可持续开采,热储层长期的储存量变化量必须是0,即

$$dV/dt=0$$

则新的可持续开采状态下的地热水均衡方程为

$$QS=\Delta R_0+\Delta D_0$$

该公式阐释了开放型地热系统地热水可持续开采量的资源构成要素,等于地热水开采状态动力条件下激发的深循环运移补给增量和减少的天然排泄量之和,即为捕获量。

水位和水温的动态稳定性指示了东汤温泉水热系统的开放性和可更新性,即深循环地热流体既可获得深部热能的补给,也能够获得现代水的深循环运移补给,在控制最大水位降深不大于33.92m条件下可实现水热均衡可持续开采。

根据开采量、水位长期动态监测资料,建立相关方程,预测评价控制地热水位降深不超过33.92m即水位埋深 D 在30m以浅,水温不低于80℃约束下的地热水可持续开采量 Q_s 为

$$QS=3583\text{m}^3/\text{d}(D\leq 30\text{m}, \text{水温}\geq 80^\circ\text{C})$$

与利用天然温泉流量与自流高度相关方程计算的地热水可持续开采量基本一致,佐证了利用

天然动态和大规模开采动态监测资料计算可持续开采量的可靠性和准确性。

1.1.3 地热系统概念模型

如图4所示,鲁东天然温泉地热系统属于隆起山地开放式对流型地热系统,能够接受现代大气降水入渗形成的地下水深循环运移补给,滨海地区在有断裂沟通时温泉还能接受海水补给,天然补给量等于天然排泄量即温泉的总流量,包括溢流至浅部基岩裂隙和松散沉积层中的流量。

地势高程差引起的重力势能差产生相应的水力梯度,驱动山区大气降水和冰雪融水入渗地下形成的常温地下水,沿深大导水断裂破碎带向深部径流运移;地下水深循环沿途从围岩中汲取热量,被深部高温热源加热,常温地下水被加热为地热水,其密度逐渐降低。补排区地势高差越大,断裂延伸越深,地下水循环深度越深,获取的深部高温热能越强,简言之即为“大高差、深循环、高热流”。当地热水循环到1~10km深时,在冷、热水密度梯度和重力势能差的共同驱动下,沿NW向强渗透导水断裂和NE向深大导热断裂倾向相向的“V”形构造破碎带交汇处折返上涌,地热水埋藏深度逐渐减小。该“V”形构造破碎带交汇处岩石更加破碎,裂隙发育,渗透性强,导水系数较围岩大1~2个数量级,吸收汇集广大围岩范围裂隙中的地热水。加之地下热水的溶蚀能力增强,致使热储层裂隙率孔隙度进一步增大,逐步发育为一个地下热水流线密集、水量丰富、水位较低的集水廊道。当地下热水沿破碎带运移至地势低洼的排泄区时,其上涌通道被后期断裂位错或遇到透水性差的岩体/岩脉阻隔,沿上述部位在静水压力最小的河床、河漫滩和河流一级阶地出露形成温泉,上涌溢流至浅部花岗岩裂隙和第四系孔隙冷水含水层的溢流量与温泉总流量之和即为地热系统的天然补给量。构成一个完整的山区大气降水入渗补给→地下水沿深大断裂深循环运移→汲取深部热能→沿导水控热断裂交汇复合处水热对流上涌聚集→天然温泉或自流井排泄的开放式带状地热系统,花岗岩裂隙热储为主要热储类型,局部为砂岩裂隙热储,沿导水控热断裂呈带状分布。通常热流通量背景越高、地下水循环深度越大,地下热水

温度越高,水岩反应越强烈,地热水矿化度越高。

1.2 沂沭断裂带地热区(Ⅱ)

1.2.1 源运储盖特征

沂沭断裂带地热区主要包括潍坊市、临沂市、日照市部分地区。在印支期华北板块与扬子板块碰撞拼合构造背景下形成的郯庐断裂带,是中国东部地区的巨型断裂构造带,属于岩石圈尺度的构造边界带,也是一条巨型活动断裂带。断裂带有着复杂的形成演化历史,经历了平移、伸展和挤压等构造活动过程。沂沭断裂带呈NEE方向沿着沂河和沭河展布,是郯庐断裂带的山东段,控制着山东的地层、构造、岩浆岩、矿产资源、地震活动等,影响了该地区的地层建造、构造格架、岩浆活动、成盆、成矿作用及资源环境等。经历长期构造活动和演化,郯庐断裂带内部结构复杂,不同区段、不同时期的构造活动方式不尽相同。沂沭断裂带作为郯庐断裂带的中段,活动断层发育,其在平面上由马站苏村地堑、汞丹山地垒和安丘莒县地堑构成了“两堑夹一垒”的构造格局(图1, 2),控制了中生代的岩浆活动和内生成矿作用。铜井金矿成矿与沿沂水—汤头断裂上侵的沂南铜井杂岩体关系密。

主要热储为受断裂构造控制的基岩裂隙热储,包括层状热储和带状热储。层状热储主要分布于凹陷区内,中生代火成岩和砂页岩是保温性能良好的热储盖层,其下伏的寒武纪和奥陶纪灰岩为主要层状热储层。深部高温热能沿沂沭断裂带的上涌对流传热为带状热储的主要热源机制。同时,高大地热流背景亦为层状热储提供面状热源。在对流热源与传导热源交汇处,形成传导对流复合叠加型热源,于浅部形成更高的地温梯度异常区和高热流通量区。

带状热储分布在两组以上断裂交汇部位,特别是凹陷区边缘的两组以上断裂交汇部位。由于区内不同走向断裂纵横交错,构造裂隙发育,加之岩浆岩冷凝过程中与围岩间形成大量裂隙,在凹陷区边缘适宜构造部位可以形成带状热储,热储岩性为白垩纪安山岩或砂岩,热源以深循环对流型为主,汤头温泉即为典型案例。

1.2.2 典型地热系统

以靠近沂沭断裂带最西侧郯部—葛沟断裂的沂南铜井地热系统为例阐明地热地质特征和水源热源机制。如图5所示,位于铜井地热系统北西方向的新浦山凸起断块为补给区,大气降水入渗地

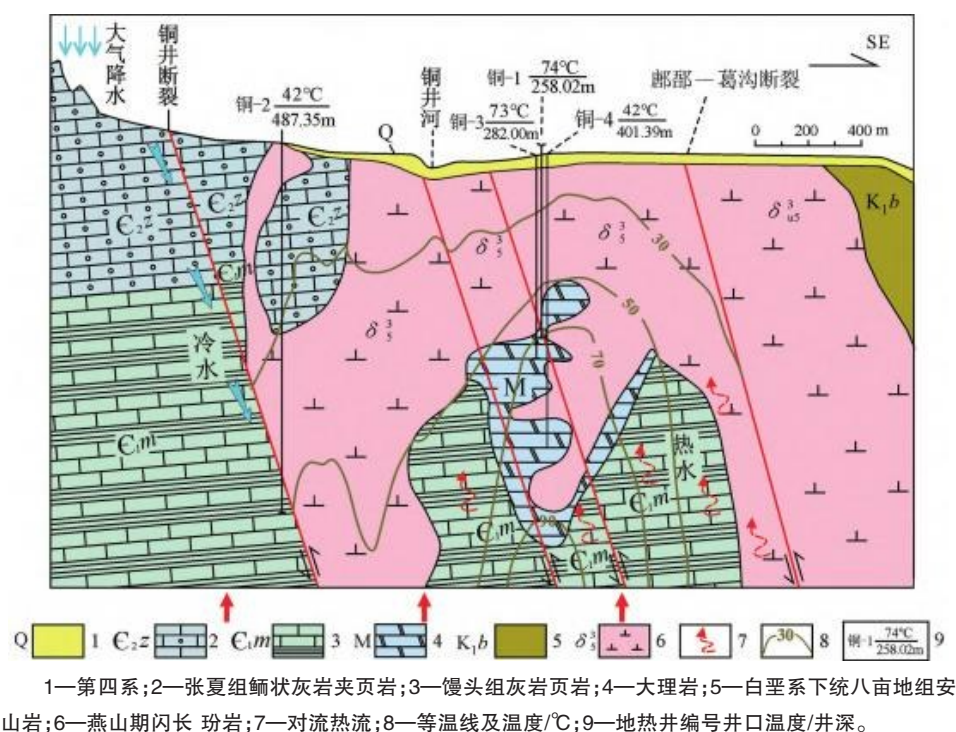


图5 沂沭断裂带地热区沂南铜井地热系统水源热源及其富集机制图

下形成的常温地下水,在重力势能差产生的水力梯度驱动下,沿NW向铜井断裂向东南径流,深循环运移途中被沿途围岩加热。运移至挤压强烈、深达上地幔的郧部—葛沟断裂时,常温地下水被沿其上涌的深部热源加热成地热水,密度逐渐降低,富集于郧部—葛沟断裂西侧;地热水在上部冷水、深部热水密度梯度和重力势能梯度的共同驱动下对流循环上涌,沿铜井断裂和NNE向F16张性破碎带交汇部位强渗透带,地热水承压水头迅速抬升,上涌运移途中遇不透水的燕山期沂南铜井闪长岩体阻挡,承压富集于大理岩与岩体接触带的层间岩溶发育带。在层间岩溶与断裂交汇处,形成带状层状复合型强岩溶发育带复合型热储,也构成铜井地热系统的热能聚集和承压地热水富集带,该带即是铜井地热系统核心,也是热储层地热流体向浅部第四系孔隙冷水含水层和块状岩类裂隙冷水含水层扩散的中心。

铜井地热系统分布面积 3.7km^2 ,热储温度 $45\sim$

92°C 。热储层为隐伏于铜井闪长岩体之下的中、下寒武系地层,岩性以大理岩和灰岩为主,其次为砂岩、页岩等。盖层为铜井岩体侵入岩类,岩性主要为闪长岩、闪长玢岩等。地温梯度一般在 $15\sim 20^\circ\text{C}/100\text{m}$,最高达 $34.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。如铜1地热井,井深 258.02m ,上部盖层为铜井岩体,致密坚硬,保温隔水性能好。其下伏地层为寒武系中、下统灰岩和砂岩,其中,灰岩经岩浆侵入烘烤而发生热变质为大理岩,钻至 243m 时遇馒头组大理岩和结晶灰岩,涌出地热水,水温 74°C 左右,最高达到 92°C ,自流量 $737.16\text{m}^3/\text{d}$,承压水头高出地面 2.3m 。水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,矿化度 2010mg/L 。铜3地热孔,孔深 282.00m ,热储顶板埋深 239.18m ;在该孔揭露热储前、后分别进行过系统测温:2002年10月8日钻至 230m 、揭露热储前,盖层地温梯度为 $21.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ (图6), 230m 深度地温为 63.5°C ;2003年6月8日终孔后自流,孔口温度 67.8°C ,孔底 74.5°C ,温降 6.7°C 。承压水头高出地面 0.50m ,

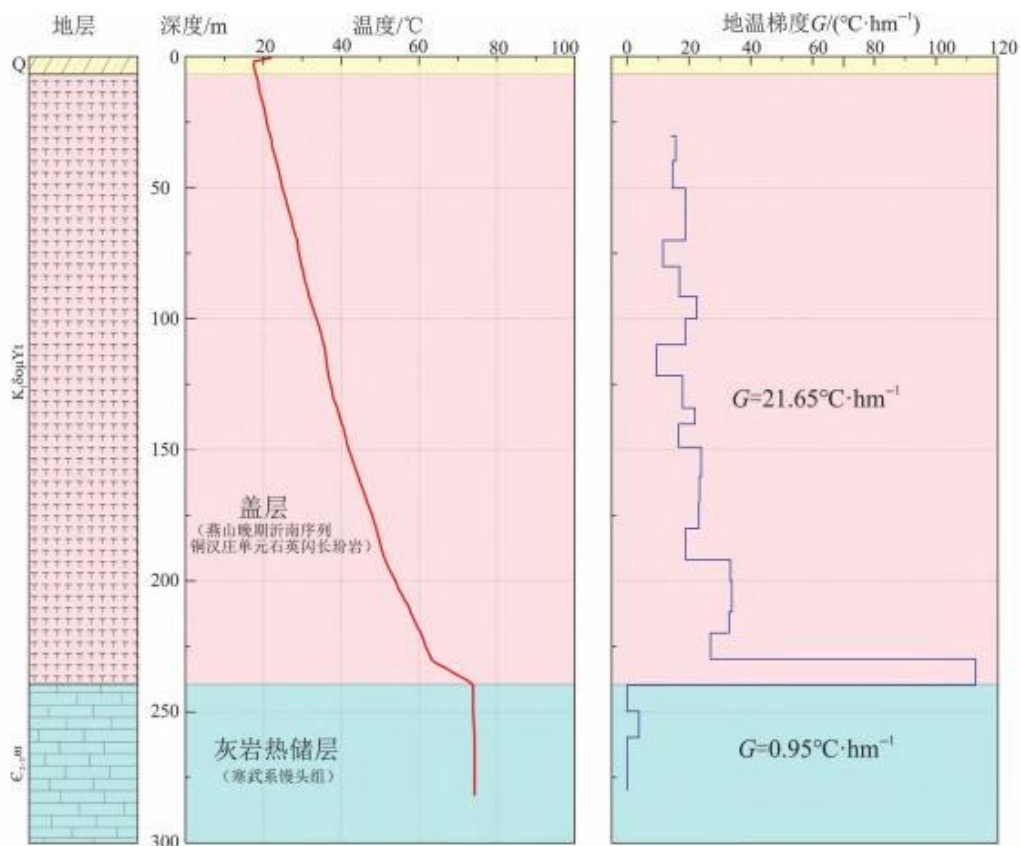


图6 沂沭断裂带地热区沂南铜井地热系统铜3地热井测温曲线与地温梯度曲线

自流量 150m³/d。

据 2003 年一个水文年的动态监测数据^[13], 铜 1 地热井一直处于自流状态, 地下热水与大气降水有一定的水力联系, 地下热水最高水位比大气降水量滞后约 2 个月, 地下热水水温年变化范围在 73.0~73.5℃, 年变幅 0.5℃, 地下热水承压水头高出地面 0.438~1.518m, 年变幅 1.08m。与 1997 年 7 月成井时相比, 26 年间水温下降 0.5~1.0℃, 承压水头下降了 0.482~1.562m, 平均下降了 1.02m, 年降幅约 0.039m, 表明地下热水在自然状态下水温和承压水头比较稳定。年内水位变幅为 1.00m。2003 年 12 月枯水期, 承压水头高出地面 1.28m, 自流量 260m³/d, 井口水温为 73.4℃。

承压水头、自流量和水温 26 年动态稳定性指示铜井地热系统属于开放式地热系统, 自流量和上涌扩散至第四系孔隙和块状岩类裂隙冷水含水层的水量之和即是该地热系统补给量和可采资源量。

1.2.3 地热系统概念模型

地热系统概念模型概括为山区大气降水入渗补给→地下水沿深大断裂深循环运移→汲取深部热能→沿导水控热断裂交汇复合处水热对流上涌聚集→天然温泉或自流井排泄的开放式带状地热系统, 热储类型以碳酸盐岩岩溶裂隙热储和安山岩裂隙热储、石英砂岩裂隙热储为主, 分布位置受控于沿沂沭断裂带分布的侵入岩体或火山口、火山岩喷发带裂隙发育区。

深达上地幔的郯部—葛沟断裂、沂水—汤头断裂、安丘—莒县断裂和昌邑—大店断裂沟通的深部热源是主控热源, 受其控制的中基性岩浆喷发带和酸性岩体侵入围岩接触带是深部热能上涌运移主要通道。

铜井断裂、孙祖断裂等 NW 向张性断裂是主要水源控制断裂。山区大气降水入渗补给形成的地下水, 在地势高程差引起的重力势能差产生相应的水力梯度驱动下, 沿 NW 向导水断裂向东南径流, 深循环运移途中被沿途围岩加热。运移至挤压强烈、深达上地幔的沂沭断裂带时, 常温地下水被沿其上涌的深部热源加热成地热水, 密度逐渐降低, 富集于沂沭断裂带西侧。在上部冷水、深部

热水密度梯度和重力势能梯度的共同驱动下水热对流、循环上涌, 聚集于沿 NW 向和 NE、NNE 向张性破碎带交汇部位形成的强渗透带, 形成天然温泉或承压自流区。火山口和火山岩喷发带、侵入岩体围岩蚀变带裂隙发育, NW 向与 NE、NNE 向沂沭断裂带次级断裂破碎带交汇复合处为热能聚集和承压地热水富集带。

1.3 鲁西隆起地热区(Ⅲ)

由三级构造单元鲁中南隆起和鲁西南潜隆组成, 西、北分别至兰聊断裂和齐广断裂, 东至沂沭断裂带之西支郯部—葛沟断裂影响带。根据热源和水源及其富集特征, 鲁西隆起地热区进一步划分为两个亚区, 即鲁中南隆起地热亚区(Ⅲ1)、鲁中南隆起北缘和鲁西南潜隆地热亚区(Ⅲ2)。Ⅲ1 亚区东以郯部葛沟断裂为界与沂沭断裂带地热区相接; Ⅲ2 亚区以第四系和新近系零米厚度等值线作为分界线。地热井主要分布在Ⅲ2 亚区的聊城东部、齐河南部、济南北部、淄博北部、菏泽城区及鄆城、曹县、定陶等地, 其次分布在Ⅲ1 亚区的泰莱盆地、汶口凹陷、沂源盆地、平邑凹陷和沂沭断裂带西侧的沂南地区。

1.3.1 鲁中南隆起地热亚区(Ⅲ1)

(1) 源运储盖特征。

鲁中南隆起地热亚区(Ⅲ1)山前热储主要为受断裂构造控制的古生代寒武—奥陶纪碳酸盐岩裂隙岩溶带状热储; 其次为受断裂构造控制的花岗岩裂隙带状热储, 属能够接受现代大气降水入渗补给的开放式带状地热系统。深部高温热能沿深大断裂的上涌对流传热为主要热源机制, 形成沿深大断裂分布的高地温梯度和高热流通量区。

层状热储主要分布在近东西向展布的各断陷盆地底部, 热储岩性主要为灰岩、大理岩, 大地传导热为主要热源, 局地存在构造对流热。不同的构造单元盖层组合不同, 从中生界到上古生界皆可构成热储的盖层。热储顶板埋深、水温差异较大, 埋深一般 400~2750m、水温 25.5~90℃, 单井涌水量为 1200~1954m³/d, 地热水矿化度为 0.672~9g/L, 水化学类型主要为 SO₄-Ca·Na、HCO₃-Ca·Mg 和 Cl·SO₄-Na 型。

(2) 典型地热系统。

以泰安岱道庵—桥沟和肥城安驾庄地热系统为例阐明地热地质特征及水源热源机制。

如图7所示,岱道庵和桥沟地热系统位于泰山南麓、泰莱断陷盆地地热系统的边缘地带,大气降水在泰山山区入渗补给地下水,在重力势能差驱动下,浅层地下水沿深大断裂深循环运移,深循环运移过程中汲取沿途围岩和深部热流后被加热成高温地热水,在重力势能和冷热水密度差双重驱动下,深部高温地热水运移至泰山南麓、泰莱断陷盆地北缘时,受到盆山分界断裂NEE向泰山—大王庄断裂带阻挡,致使一部分地热水沿NNW向岱道庵断裂与NEE向泰山—大王庄断裂交汇形成的强裂隙岩溶发育带和高渗透带上涌至地表成温泉,一部分地热水赋存于沿断裂带发育的带状寒武系灰岩裂隙岩溶热储,热储岩性为张夏组鲕状灰岩和朱砂洞组含燧石结核灰岩和白云岩,盖层为固山组页岩、炒米店组灰岩、三山组(含燧石结核)白云岩和马家沟群灰岩。显然,岱道庵为复合断裂构造控制的灰岩带状热储地热系统。另一部分地热水继续沿断裂带和裂隙岩溶发育带向排泄区径流,在桥沟与沿NW向滂河断裂和NEE向徂徕山断裂交汇处上涌的地热水混合,形成复合断

裂构造控制的桥沟花岗岩带状热储地热系统。地温梯度 $3.3\sim 23.08^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,具有较高的热流通量值。如岱道庵DR3地热井(图8),地温梯度为 $3.38^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,石灰岩和页岩的平均热导率为 $3.308\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,则热流通量为 $111.81\text{mW}/\text{m}^2$ 。

而位于泰莱断陷盆地内部的莱芜冷家庄地热系统属于典型的沉积盆地传导型地热系统,DR1地热井奥陶系灰岩热储顶板埋深为2170m,成井深度为2700.66m,地热水矿化度为3.078g/L,水化学类型为 $\text{SO}_4\text{--Na}\cdot\text{Ca}$ 型,累计岩溶发育段即含水层厚度为170.60m,平均裂隙率为5%。静水位埋深为49.70m,降深198.4m时涌水量 $1064.10\text{m}^3/\text{d}$,井口水温 82.3°C 。盖层为古近系大汶口组E2d(260~1802m)泥岩与粉砂岩互层、石炭—二叠系(CP)(1802~2170m)含煤层粉砂岩与泥岩,平均热导率为 $2.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,平均地温梯度为 $2.86^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,则大地热流值为 $60.06\text{mW}/\text{m}^2$,属于单一大地热流传导增温,据此作为岱道庵—桥沟地热系统热流通量中的传导分量,则岱道庵DR3地热井对流分量为 $51.75\text{mW}/\text{m}^2$,占比46.3%。

显然,岱道庵—桥沟地热系统均是复合活动断裂带控制的开放式深循环对流型带状地热系

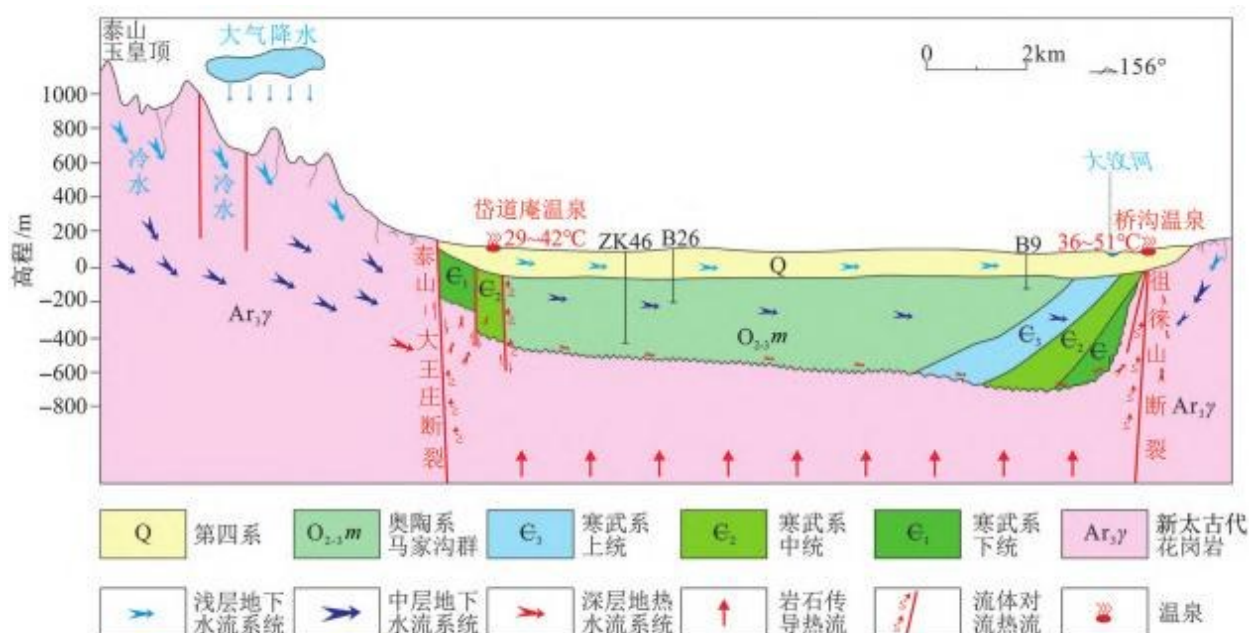


图7 鲁西隆起地热区鲁中南隆起地热亚区泰安岱道庵—桥沟开放式深循环对流型地热系统水源热源及其富集机制图

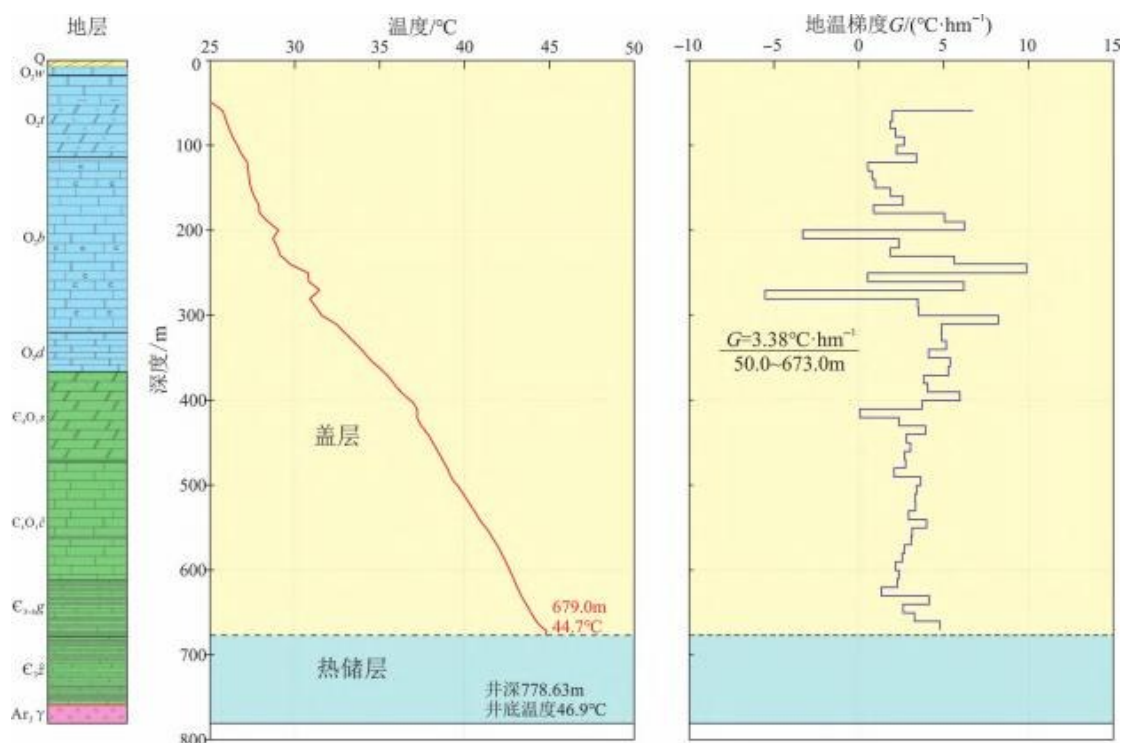


图8 岱道庵地热系统 DR3地热井测温曲线与地温梯度曲线

统,沿泰山一大王庄、滂河、徂徕山等深大断裂带上涌的对流传热为主要热源机制。地热水温 35~55℃,矿化度 360~795mg/L,水化学类型一般为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型,呈现淡水水化学特征,亦指示其能够获得现代水补给的开放特征,温泉流量与溢流至浅层地下水含水层的流量之和即为地热系统的补给量和可采资源量,构成完整的山区大气降水入渗补给→地下水深循环运移→汲取深部热能→沿断裂交汇复合部位水热对流上涌聚聚→温泉和自流溢出排泄的开放式深循环对流型带状地热系统,水源热源及其富集机制见图7。

肥城安驾庄地热系统大地构造上属华北板块(I)之鲁西隆起区(II)之鲁中南隆起(II_a),处于东平凸起(II_{a4})、蒙山凸起(II_{a5})和汶东凹陷(II_{a5})3个五级构造单元交汇部位。断裂构造发育,走向主要为近EW、NNE、NE、NW向和近SN向,其中NNE向构造为活动断裂,沟通了深部热源。深循环地下水被深部热源加热后,沿新构造断裂交汇部位形成的高渗透带,上涌至溶孔溶隙发育的寒武系朱砂洞组(含燧石结核)白云岩、白

云质灰岩和泥质白云岩热储层中,在上覆阻热和隔水性能良好的馒头组砂页岩阻滞下,地热水沿层间岩溶发育带横向流动和扩散,形成带状层状复合型岩溶热储。位于肥城市安驾庄镇东赵庄东侧的ZK1地热井(图9),井深340.45m,井底温度72.6℃,井口出水温度61℃,涌水量为2352.76m³/d(降深12.87m)。

地热水矿化度为1.807g/L,水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。馒头组砂页岩和灰岩、张夏组灰岩盖层平均地温梯度达9.72℃/100m。根据传导段最小地温梯度5.47℃/100m(图9②)、张夏组灰岩热导率为3.321W/(m·K)和馒头组页岩热导率2.657W/(m·K),计算热流通量为163.5mW/m²。仍以莱芜冷家庄沉积盆地传导型地热系统DR1地热井大地热流值60.06mW/m²作为安驾庄地热系统热流通量中的传导分量,则其对流分量为103.44mW/m²,占比63.3%。

综上,鲁中南隆起地热亚区(III1)山前即盆地边缘地热系统多为断裂控制的开放式深循环对流型带状地热系统,而盆地内部则为封闭式传导型层状地热系统。

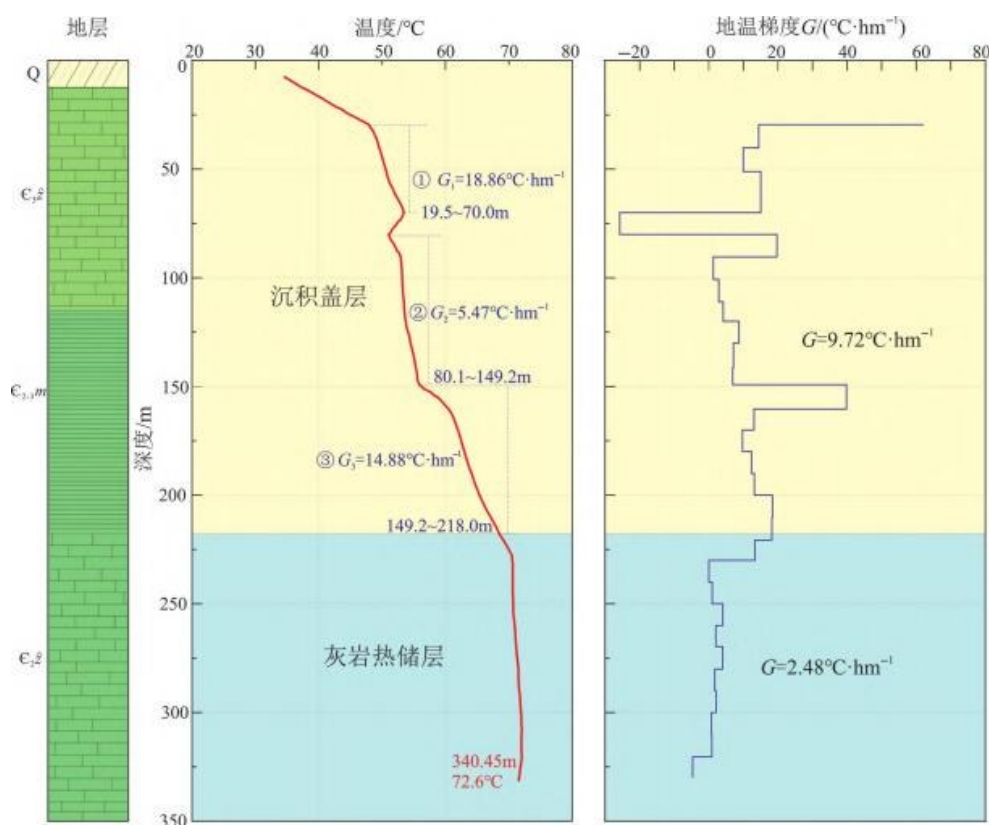


图9 肥城安
驾庄地热系统 ZK1
地热井测温曲线及
地温梯度曲线

(3) 地热系统概念模型。

泰山山前地热系统概念模型概括为泰山山区大气降水入渗补给形成的地下水→沿倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 的泰山山前泰山大王庄断裂深循环运移→汲取深部热能→水热沿泰山一大王庄断裂与岱道庵断裂交汇复合处对流上涌聚集→天然温泉和自流溢出排泄的开放式带状地热系统,热储类型以碳酸盐岩岩溶裂隙热储和花岗岩裂隙热储为主,分布位置受控于泰山大王庄等盆地深大分界断裂。

NEE 向泰山一大王庄断裂是由内、外弧构成的复合断裂,切割太古宇、下古生界地层和燕山期岩体,并控制泰莱断陷盆地的北边界,垂直断距 $> 1000\text{m}$,沿断裂有燕山期岩浆侵入,指示其为沟通深部热源的控热断裂。走向 NNW、倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 的岱道庵断裂为导水断裂。NNW 向岱道庵断裂与 NEE 向泰山一大王庄断裂交汇复合处应力最集中,岩石最破碎,裂隙岩溶最发育,形成强裂隙岩溶发育带和高渗透带,为热能聚集和承压地热水富集带。馒头组页岩保温盖层地温梯度为 $3.3\sim 23.08^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,越靠近断裂构造交汇复合部位,地

温梯度和热流量越大,指示沿深大断裂上涌的对流热为主要热能来源。

断陷沉积盆地内部封闭式传导型地热系统的成因机理与鲁西北坳陷地热区(Ⅳ)类似,将在 1.4.3 节中一并予以阐释。

1.3.2 鲁中南隆起北缘、鲁西南潜隆地热亚区(Ⅲ₂)

鲁中南隆起北缘及鲁西南潜隆地热亚区(Ⅲ₂)主要热储为古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩层状岩溶热储,局部为带状兼层状复合型热储。其次为新近纪馆陶组砂岩孔隙裂隙层状热储。根据热储埋藏、地热流体和热源条件差异,进一步划分为鲁中南隆起北缘和鲁西南潜隆两个地热子区。

(1) 源运储盖特征。

1) 鲁中南隆起北缘地热子区。

鲁中南隆起北缘地热子区分布于东阿县牛角店至临淄区金岭镇之间山区与平原交接部位以北、齐广断裂以南。由图 1 可见,沿齐广断裂南侧分布有齐河—禹城闪长岩体、济南辉长岩体、埠村辉长岩—闪长岩杂岩体、邹平辉长岩—二长岩杂岩体和淄博金岭闪长岩杂岩体。这些呈东西向条带

状分布的岩体对自南部山区浅、中循环岩溶地下冷水向北径流起到阻滞作用,区域水头压力差驱动一部分常温岩溶地下水沿岩体与灰岩接触带向深部运移,运移途中不断从含水介质和围岩中汲取热量,接受大地热流的传导加热、沿导热断裂或岩体/可溶岩接触带的对流聚热、凸起区高热导率分流聚热而演化为地热水,深循环地下水系统演变成弱开放式岩溶地热水流系统。岩溶地热水继续向北运移至齐广断裂,被弱透水砂岩泥岩地层阻隔而富集于齐广断裂南侧,形成阻滞型岩溶地热水富集构造。

在层间岩溶与断裂破碎带或侵入岩体/灰岩接触带交汇处,形成强岩溶发育带和地热水富集带,加之上覆新生界、中生界和上古生界热储盖层保温作用,在平阴—长清—济南—明水—淄博以北至齐广—兰聊断裂之间的山前倾斜平原和冲积平原区,形成聊东、齐河、济南北、章丘、周村、淄博北等山前岩溶热储地热系统。寒武—奥陶系灰岩热储顶板埋深200~3000m,由南而北埋深逐渐增大,井口水温35~96℃,单井涌水量485~9000m³/d,地热水矿化度为0.4~7.3g/L,水化学类型为SO₄-Ca、SO₄-Cl-Ca·Na、Cl·SO₄-Na·Ca型和Cl·SO₄-Na型等。具有热储埋深差异大、涌水量丰富、易采易灌等特点。

2) 鲁西南潜隆地热子区。

鲁西南潜隆地热子区分布于兰聊断裂以东、峰山断裂以西、汶泗断裂以南地区,由一系列凸起和凹陷组成,主要分布下古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩岩溶热储,热储埋深东西向差异较大,西部潜凸区盖层主要为第四系和新近系,热储顶板埋深500~1400m。而东部凹陷区盖层增加了中生代和晚古生代地层,热储顶板埋深800~2200m。已发现聊城、鄄城、菏泽、郓城、济宁、滕州等岩溶热储地热系统,钻获地热井主要分布在菏泽潜凸起(图2)、阳谷潜凸起和青堍集潜凸起区,盖层地温梯度一般为2.5~4.73℃/100m,水温为45~68℃,单井涌水量为1732~10800m³/d,矿化度为3.60~4.11g/L,水化学类型主要为Cl·SO₄-Na·Ca、SO₄-Na、SO₄-Na·Cl和SO₄-Ca·Na型。成武凹陷内分布有新近系馆陶组热储层,顶板埋深1129~1336m,底板埋深由东向西逐渐增加,达1577~2041m。热储层平均厚度

575.83m,与下伏东营组呈不整合接触。砂岩含水层约占本组地层厚度的47%,厚度为200~300m,单层厚度大,平均大于10m,井口水温60℃左右。

(2) 典型地热系统。

1) 鲁中南隆起北缘地热子区。

康凤新等^[14]研究结果显示:沿齐广断裂南侧侵入的济南—淄博金岭岩体带不仅控制了岩溶地热水的形成和富集,也控制了地温场的空间分布特征(图1)。以济南北地热系统为例,阐明侵入岩体对地温场的控制作用。如图9所示:伴随着白垩纪燕山期辉长岩体的侵入,在岩体北部边缘形成一系列的NE和NW向断层,将济南辉长岩体北部“灰岩条带”切割成若干断块,致使岩体北部灰岩呈弧形条带状展布。盖层地温梯度>4℃/100m的高地温异常区,主要分布在济南岩体北侧“灰岩条带”及其北部边缘,大致呈近东西向带状展布,奥陶系灰岩埋藏浅(194~600m),地温梯度高达4.65~6.49℃/100m,平均为5.2℃/100m。如:位于济南岩体/灰岩接触带的济BK1孔,地温梯度达4.80℃/100m;位于济南岩体/灰岩接触带边缘、南车断裂附近的济古1孔,地温梯度达4.65℃/100m;位于济南岩体/灰岩接触带边缘、鸭旺口断裂附近的YK2地热井,地温梯度达4.87℃/100m。如前述,位于济南岩体/灰岩接触带和滩头断裂交汇处坝子村BY16(原始编号DR2)井,地温梯度最高,达6.49℃/100m(图10),无疑是深部地下热水沿济南辉长岩体与灰岩接触带以及滩头断裂上涌,水热对流和热传导相叠加而成。与正常传导增温地层分布区地温梯度3℃/100m相比,其超出部分为1.65~3.49℃/100m,平均为2.2℃/100m,即为深部地下热水沿济南辉长岩体与灰岩接触带及滩头断裂带上涌、水热对流所致,占比达19.2%~67.1%,平均占比为42.3%。因盖层岩性基本相同,其热导率也基本一致,故地温地梯度的差异也基本反映了总热流的差异。该结果与姚亚辉等测定的雄安新区D01井岩溶热储热对流占总热流的比例48%接近。

层间岩溶与断裂破碎带或侵入岩体/灰岩接触带交汇处,裂隙岩溶发育,渗透性强,地热水流线密集,形成强岩溶发育带和地热水富集带。在济南岩体/灰岩接触带与NE、NW向张性断裂交汇处,

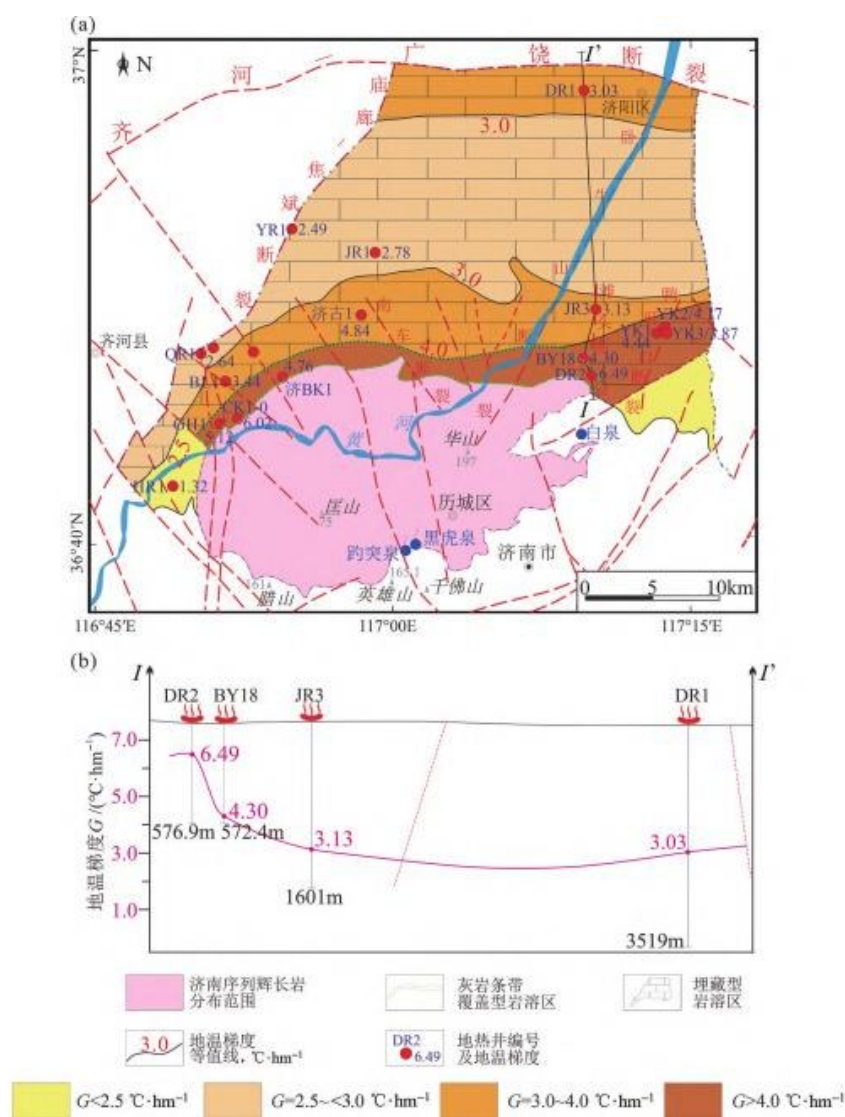


图10 济南辉长岩体与齐广断裂控制的岩溶热储盖层地温梯度等值线图(a)和剖面图(b)(据文献修改)

灰岩热储顶板埋深较浅,一般小于500m,地热单井涌水量最大,富水性最强。如位于济南岩体/灰岩接触带与滩头断裂、鸭旺口断裂交汇处的地热井,单井涌水量普遍大于5000m³/d,目前仍可自流。其中涌水量最大的为BY16(原始编号DR2)地热井,井口水温36℃、TDS质量浓度5.17g/L、降深12.05m时涌水量达9000m³/d。

2) 鲁西南潜隆地热子区。

菏泽潜凸起岩溶热储地热系统为勘查开发利用程度较高的地热系统(图2);据康凤新等研究成果(图11):岩溶地热水主要补给源为梁山和嘉祥一带基岩山区大气降水入渗形成的地下水深循环

径流补给,属于弱开放式岩溶热储地热系统。在导水断裂带、层间岩溶发育带,裂隙岩溶发育,形成地下水强径流带,为地热水的储存和循环富集提供了空间,是地热水富集区。特别是在断裂构造复合部位、构造岩溶与层间岩溶复合位置,裂隙、溶孔溶洞更为发育,裂隙岩溶率可达6%~54%,岩溶发育段厚度18~133m,形成强裂隙岩溶发育带,进而形成强渗透、高导水优势通道,将大范围面状热储层中的地热水汇集到该优势导水通道,形成地热水强径流富水带,裂隙岩溶率、渗透系数和导水系数可较围岩大1~3个数量级。因此,导水断裂带与层间岩溶复合部位是地热水循环富集带。如郓城文昌苑YR1地热井,位于田桥支断裂、赵河东断裂与赵河背斜轴部交汇复合部位,历经多期次构造运动,裂隙岩溶十分发育,发育深度1022.98~1446.30m。累计含水层厚度102.4m,降深10.35m时涌水量高达10800m³/d,富水性极强。

常温地下水自梁山、嘉祥补给山区浅循环开放式地下水流系统,向郓城及巨野一带径流区中循环半开放式地下水流系统径流,一小部分岩溶地下水继续向菏泽城区、鄄城县城排泄区等深循环弱开放式地热水流系统长距离深循环运移,通过热传导不断从围岩中汲取热量。同时,深部热流沿兰聊、田桥和汶泗等深大断裂上涌,循环深度2~3km的深循环地下水逐渐被加热成地热水。在补给区和排泄区间重力势能差和冷水、热水密度梯度共同驱动下上涌至浅部,沿高渗透性断裂破碎带向浅部运移聚集,水热对流能力明显升高,大地热流传导和水热对流相叠加形成浅部带

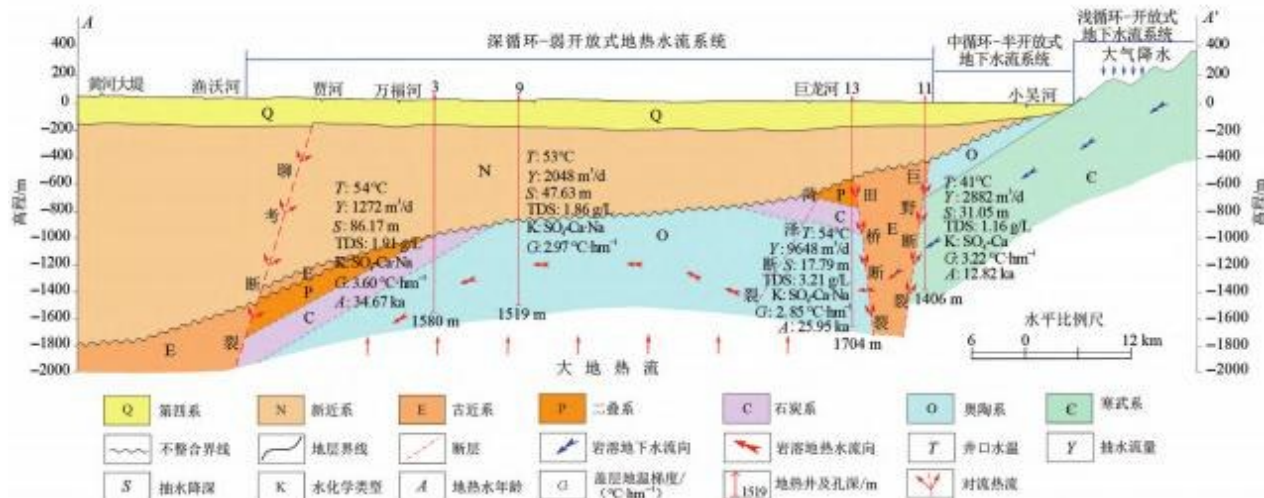


图 11 菏泽潜凸弱开放式岩溶热储地热系统水源热源及其富集机制图(据文献修改)

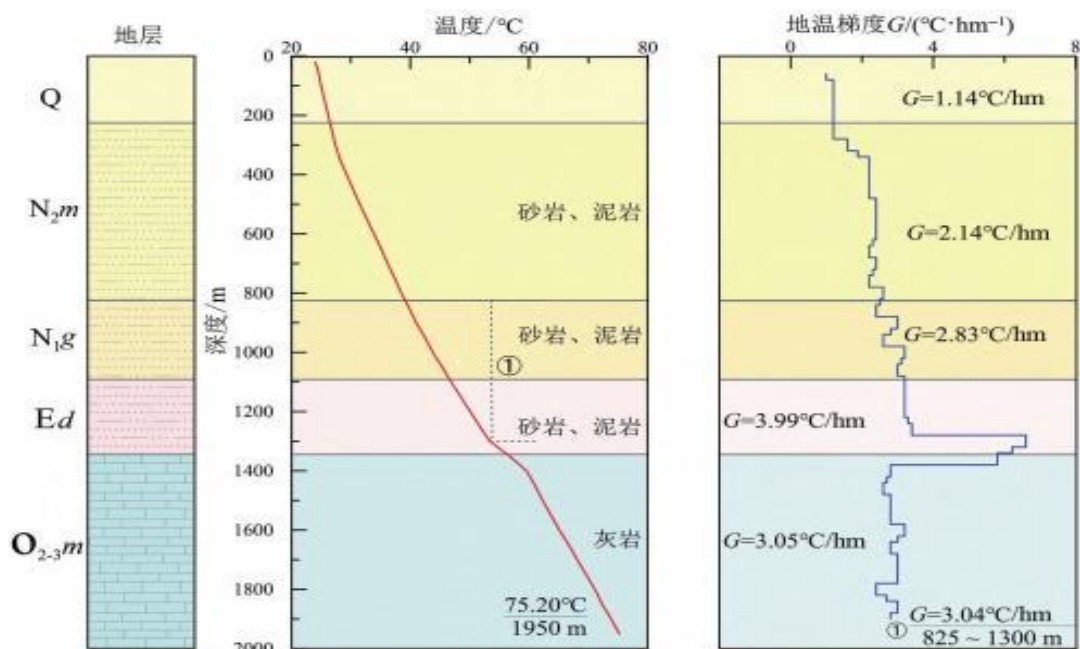


图 12 兰聊断裂和皂山断裂交汇复合部位曹县庄寨 CZ1 地热井测温曲线与地温梯度曲线

状高地温梯度和高大地热流值异常区(图 11)。如位于兰聊断裂和皂山断裂交汇复合部位的曹县庄寨 CZ1 地热井(图 12),大地热流值为 89.25W/m^2 。在古近系盖层与奥陶系灰岩热储层界面处地温梯度陡增至 $6.2^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。1350~1950m 深度奥陶系灰岩热储层温度 $56.7\sim 75.2^\circ\text{C}$, 增温 18.5°C , 地温梯度仍达 $3.05^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。在静水位埋深 17.53m、降深 33.43m 时涌水量为 $2163.36\text{m}^3/\text{d}$, 井口水温 69°C 。

(3) 地热系统概念模型。

鲁中南隆起北缘地热子区地热系统概念模型概括为大气降水入渗地下形成的常温地下水,在静水压力梯度驱动下,自泰山、鲁山、沂山山脉北麓之浅循环开放式地下水流系统,向北部聊城、济南、邹平、章丘、淄博等覆盖型岩溶区中循环半开放式地下水流系统径流,径流途中遇不透水的辉长岩/闪长岩/石炭系一二叠系砂岩泥岩阻水地层

阻挡,岩溶地下水便在石灰岩和辉长岩/闪长岩/砂页岩接触带富集,在地形低洼部位通过第四系或穿过辉长岩、闪长岩风化裂隙和构造裂隙发育凹槽上升成泉,包括济南趵突泉、章丘百脉泉、淄博泮水泉群等,岩溶地下水和泉水温度为17℃左右,形成了典型的单斜承压自流构造。一小部分约10%来自半开放地下水流动系统的岩溶地下水从岩体下部或阻水地层下部沿裂隙岩溶通道继续向下游深循环运移,运移至兰聊、齐广断裂时,深循环地下水被弱透水砂岩泥岩地层阻滞于断裂东南侧或南侧,形成阻滞型岩溶地热水富集构造、弱开放式地热系统(图1)。鲁西南潜隆地热子区则是自梁山、嘉祥补给山区浅循环开放式地下水流动系统,向郓城及巨野一带径流区中循环半开放式地下水流动系统径流,一小部分岩溶地下水继续向菏泽城区、鄄城县城排泄区等深循环运移,运移至兰聊断裂带时,深循环地下水被阻滞于兰聊断裂东南侧,亦形成弱开放式地热系统(图11)。层间岩溶与断裂破碎带或侵入岩体/灰岩接触带交汇复合处,裂隙岩溶发育,渗透性强,地热水流线密集,形成强岩溶发育带和地热水富集带。

岩溶地下水自上游浅循环开放式地下水动力系统,向中游中循环半开放式地下水动力系统和下游深循环弱开放式地热水动力系统径流途中,经过长距离的深循环运移,通过热传导不断从含水介质和围岩中汲取热量而被加热,运移至沟通深部高温热源的深大断裂或岩体/可溶岩接触带时,深循环地下水被沿其上涌的深部高温热源加热成地热水。在上部冷水、深部热

水密度梯度和补排区重力势能梯度的共同驱动下水热对流,沿张性破碎带与深大断裂或岩体/可溶岩接触带交汇复合部位形成的强渗透带上涌聚集,形成水温35~96℃的聚热富水热储构造。

1.4 鲁西北拗陷地热区(IV)

鲁西北拗陷地热区主要包括东营、滨州、德州和聊城大部分地区和济南北部、菏泽西部地区,由三级构造单元济阳拗陷和临清拗陷组成,西、南边界为兰聊断裂和齐广断裂,东、北、西三面至山东省界。主要热储为新近系馆陶组(图13)和古近系东营组砂岩孔隙裂隙热储,古潜山区发育有古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶热储(图14)。

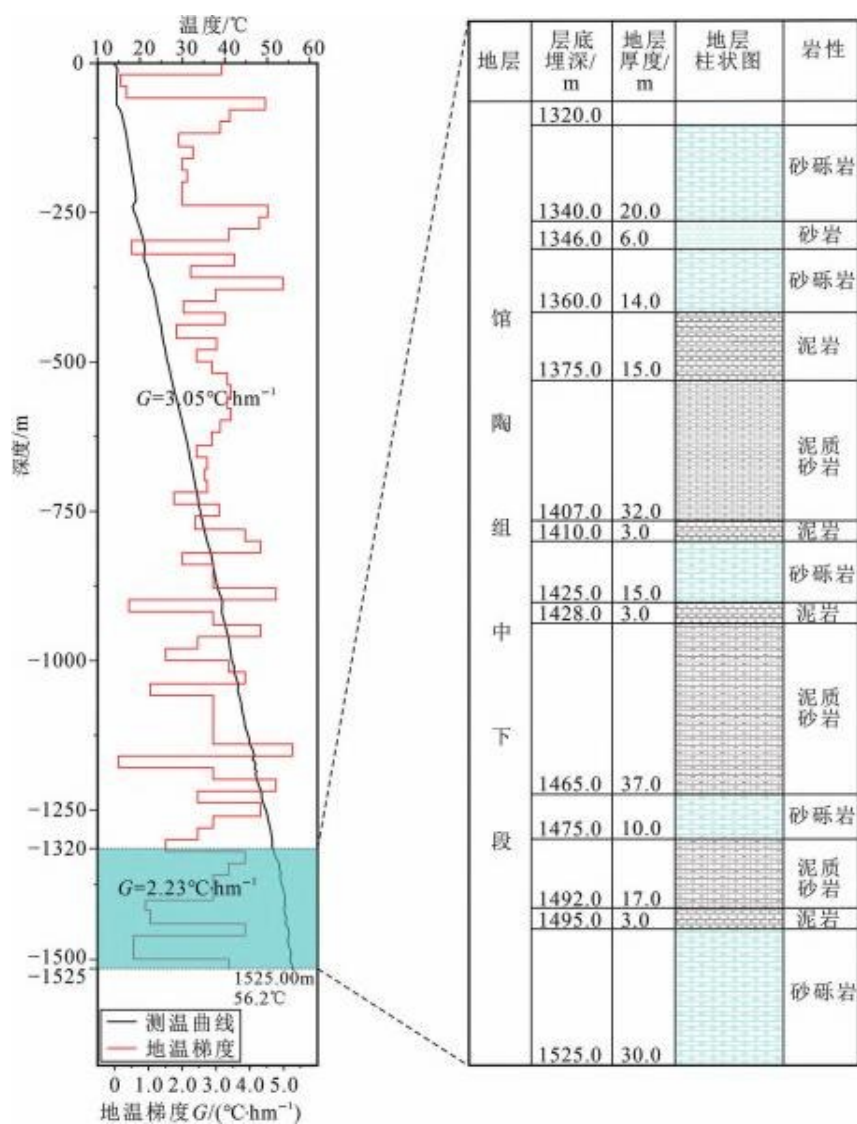


图13 鲁西北拗陷地热区德城区地热系统ZK1井测温曲线与地温梯度曲线

(接下期)

超长重力热管联合热泵的地热利用系统热力经济性分析*

蔺维杰^{1,2,3,4}, 岑继文^{1,2,3,4,†}, 蒋方明^{1,2,3,4,†}

1 中国科学技术大学 能源科学与技术学院, 广州 510640;

2 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;

3 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;

4 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640

摘 要:深层地热资源储量巨大,采用超长重力热管取热技术对深层地热资源进行开采,将其与热泵系统联合为用户供热是一种高效利用深层地热资源的方法。针对如何调节不同参数下超长重力热管与热泵联合运行以期获得最佳热力经济性的问题,建立了系统热力经济性模型,研究了热泵系统蒸发温度、超长重力热管热阻、井深、地温梯度以及蒸发器面积不同的情况下系统热力经济性变化规律。结果表明存在一个最佳蒸发温度使供热成本最低,如在地温梯度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、井深 3000 m 的条件下,最佳蒸发温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$;超长重力热管热阻越小或地温梯度越大时可实现供热成本越低且最佳蒸发温度越高;存在最佳的井深和蒸发器面积使得供热成本最低。研究结果可为优化超长重力热管在开采深层地热联合热泵系统性能方面提供理论指导。

关键词:深层地热开采;超长重力热管;热泵系统;地热利用;热力经济性分析

引 言

我国地热资源储量丰富,分布广泛。在地热资源中,干热岩地热能体现出巨大的开采价值。据统计,我国大陆 $3\sim 10\text{ km}$ 深度的干热岩所蕴含的能量折合标准煤为 856 亿吨,而我国 2022 年全国能源消费总量为 54.1 亿吨标准煤,并且国家能源局等八部门联合印发的《关于促进地热能开发利用的若干意见》中提到“到 2025 年,地热能供暖(制冷)面积比 2020 年增加 50% ;到 2035 年,地热能供暖(制冷)面积及地热能发电装机容量力争比 2025 年翻一番”。由此可见,我国在地热资源方面具有巨大的优势与潜力,并且随着国家政策的支持,干热岩地热能有望在未来成为我国能源结构中的重要组成部分,为实现能源结构转型作出重要贡献。

目前干热岩地热能的开采方式主要有增强型地热系统及同轴套管换热系统,而超长重力热管

(super-long gravity heat pipe, SLGHP)采热系统属于一种新型的干热岩地热能开采技术,其由蒋方明等提出。随后,HUANG等通过数值模拟比较了热储与热管组合系统(reservoir and heat pipe system, RHPS)和常规井下热交换器(downhole heat exchanger, DHE)系统的热提取性能,计算发现RHPS比DHE系统具有更好的热提取性能;HUANG等在河北唐山进行了 3000 m 重力热管取热实验,通过现场测试证实了利用SLGHP提取干热岩地热能的技术可行性,为开采深层地热能提供了一条新颖的技术路径。针对热管与热泵系统联合应用的研究,LIM等^[8]通过对比带有二级回路地面热交换器地源热泵、直接膨胀式地源热泵和重力热管式地源热泵,分析其能耗和性能系数(coefficient of performance, COP),发现了使用热管作为地热交换器的节能潜力;OCHSNER^[9]开发了一种新型的 CO_2 热管,将其与热泵系统结合进行研

究;EBELING等^[10]将重力热管与热泵系统结合,对重力热管的传热性能进行了实验研究,实验中重力热管长368m,使用CO₂工质,采热功率约22kW。

目前SLGHP开采干热岩热能已取得阶段性进展,亟需开展与之相适应的热利用方面的研究,且重力热管与热泵联合应用方面的研究所涉及的重力热管的长度都较短。基于此,本文主要针对深层地热能的热泵供热利用展开研究,将SLGHP与热泵系统结合,基于热力学第一、二定律和技术经济指标建立系统热力经济性模型,研究不同参数对系统热力经济性的影响,进一步推动干热岩地热能的开采及利用。

1 系统描述

图1为SLGHP与热泵结合的系统原理示意图,该系统主要由SLGHP、压缩机、蒸发器、冷凝器及节流阀组成。

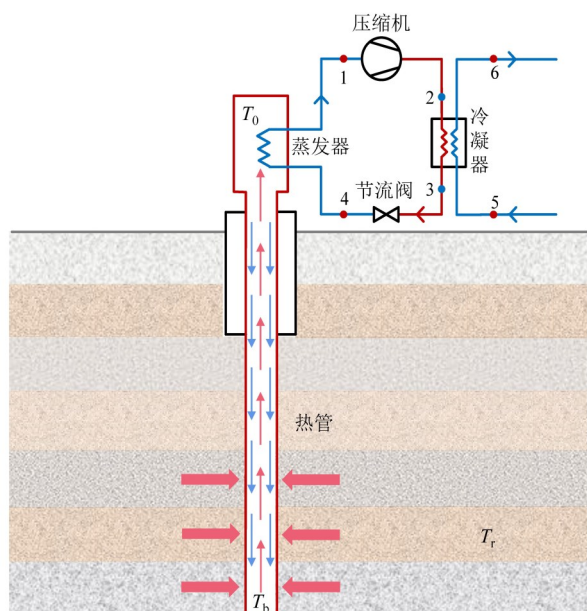


图1 SLGHP联合热泵系统原理图

SLGHP内循环工质在重力的作用下在管内发生气液相变产生自然对流效应。假定循环工质在热管两端温度分别为 T_0 和 T_b ,地层中某一点的温度为 T_r ,循环工质从地层吸取热量后将热量迅速从热管高温端传到低温端,而热管与热泵系统之间通过蒸发器进行热量传递,热泵循环主要由四个过程组成,以制冷剂R22为例,首先R22在蒸发器

内定压吸取热管传出的热量变成过热蒸汽进入压缩机(4→1过程),其次R22在压缩机中经过绝热压缩过程变为高温高压的气体进入到冷凝器(1→2过程),然后在冷凝器中经过定压放热过程冷凝为低温高压的液体流向节流阀(2→3过程),最后低温高压的液体经过节流阀膨胀变为低温低压的气液两相流体(3→4过程),随后再次进入到蒸发器进行定压吸热,如此循环工作。5→6过程为用户侧从冷凝器进行换热的过程。

2 系统模型

2.1 热力学模型

本文所涉及的物性参数均由Refprop9.1提供,该系统模型的基本假设如下:

- (1)换热器处的热量损失忽略不计;
- (2)压缩机中为绝热压缩过程,且等熵效率为压比的函数;
- (3)蒸发器出口设有一定的过热度;
- (4)用户侧进水温度为35℃,出水温度为45℃;
- (5)冷凝器出口工质温度为50℃。

参考文献将恒温带温度定为12℃,恒温带深度定为20m。

地温梯度 ΔT 的计算公式为:

$$\Delta T = \frac{T_c - T_h}{H_c - H_h} \quad (1)$$

式中: T_c 为地层测温点温度,℃; T_h 为恒温层温度,℃; H_c 为测温点深度,m; H_h 为恒温层深度,m。

对于SLGHP,其长径比非常大,因此可将SLGHP近似为一个具有显著长度的导热体。以3000m的SLGHP^[7]展开研究,其热管蒸发段为热管温度与地层温度相等时的深度至热管最底部的深度,其余段保温设置为绝热管段。热管与地层之间的总传热量 Q_1 可按单位深度积分求解^[14]:

$$Q_1 = \int_{h_0}^{h_1} \pi d_w U (T_r - T) dh \quad (2)$$

式中: h 为热管某一点距离地表的深度,m; h_0 为热管温度与地层温度相等时,距离地表的深度,m; h_1 为热管最底部距离地表的深度,m; d_w 为SLGHP的直径,取经验值,0.16 m; U 为总传热系数,

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_r 为未受扰动的地层温度, $^\circ C$; T 为热管温度, $^\circ C$ 。 U 可按照下式进行计算:

$$U = \frac{0.6k_1}{d_w} \quad (3)$$

式中: k_1 为热管与地层之间的典型有效导热系数, 取值参考文献, $4W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

假定地温及热管温度均按线性变化, 则未受扰动的地层温度 T_r 为:

$$\begin{cases} T_r = 12 & h \leq 20 \\ T_r = \Delta T(h - 20) + 12 & h > 20 \end{cases} \quad (4)$$

SLGHP 任意一点温度 T 为:

$$T = \frac{(T_b - T_0)h}{L} + T_0 \quad (5)$$

式中: L 为 SLGHP 总长度, m ; T_b 为 SLGHP 最底部循环工质温度, $^\circ C$; T_0 为 SLGHP 出口端工质温度, $^\circ C$ 。

SLGHP 内部存在热阻, 其对热管传热效率有很大影响。根据相关研究, SLGHP 的热阻受众多因素影响, 主要涉及热管几何尺寸和内部结构及工作流体种类和填充率等, 可以通过优化热管结构、优选工质等方式来减小热阻, 从而实现更好的气液分离效果, 减小流动阻力, 使得热管蒸发段温度相对均匀, 提高热管传热效率。经过研究, 热管性能提高以后热阻有望降低到 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ C/W$, 甚至更低。以热阻为 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ C/W$ 展开研究, 热阻 R 可通过下式计算:

$$R = \frac{T_{ea} - T_0}{Q_3} \quad (6)$$

式中: T_{ea} 为 SLGHP 蒸发段的平均温度, $^\circ C$; Q_3 为 SLGHP 由蒸发段传到出口端的总热量, W 。

蒸发器的入口温度为热泵系统的蒸发温度 T_4 , 为了使得制冷剂完全蒸发变为气态, 设定 $5^\circ C$ 的过热度, 则蒸发器的出口温度 T_1 为:

$$T_1 = T_4 + 5 \quad (7)$$

蒸发器处换热量 Q_2 可通过下式计算:

$$Q_2 = k_2 A_e \frac{(T_0 - T_1) - (T_0 - T_4)}{\ln[(T_0 - T_1)/(T_0 - T_4)]} \quad (8)$$

式中: A_e 为蒸发器换热面积, 取值 $100m^2$; k_2 为蒸发器换热系数, 取经验值, $2500W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

在系统模型假设条件下, 热管与地层之间的

总传热量 Q_1 、热管蒸发段到出口端的总传热量 Q_3 与蒸发器处换热量 Q_2 是相等的, 即:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (9)$$

总传热量计算流程如图 2 所示。

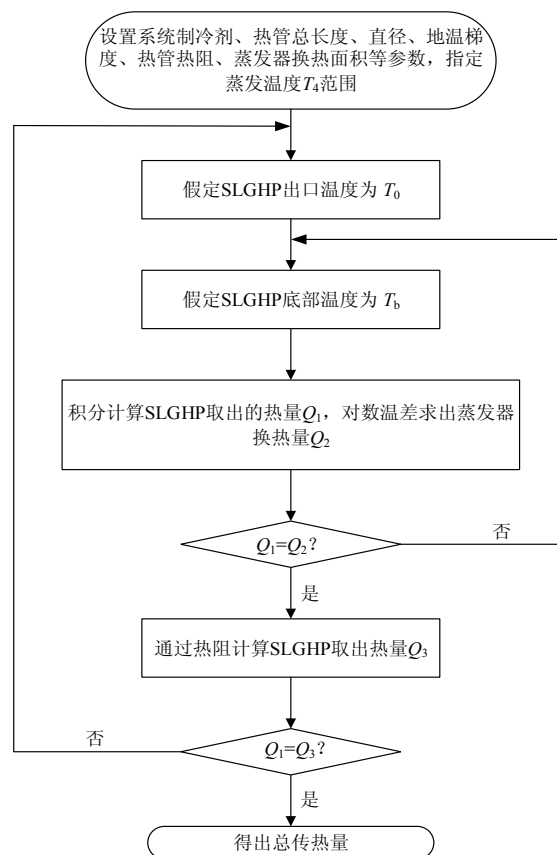


图 2 总传热量计算流程

对于压缩机模型, 引入等熵效率 η , 即:

$$\eta = 1 - 0.6 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-0.3} \right] \quad (10)$$

式中: P_1 为压缩机吸气压力, Pa ; P_2 为压缩机排气压力, Pa 。

压缩机出口实际焓值 h_{out}' 可通过下式进行计算:

$$h_{out}' = \frac{h_{out} - h_{in}}{\eta} + h_{in} \quad (11)$$

式中: h_{in} 为压缩机入口焓值, J/kg ; h_{out} 为压缩机出口焓值, J/kg 。

对于冷凝器的面积设计, 根据居民用水合理温度范围, 设定用户进口端水温 T_5 为 $35^\circ C$, 出口端水温 T_6 为 $45^\circ C$, 则可以得到以下关系:

$$m(h_{\text{out}}' - h_{\text{out}}) = k_3 A_c \frac{(T_2 - T_6) - (T_3 - T_5)}{\ln[(T_2 - T_6)/(T_3 - T_5)]} \quad (12)$$

式中: m 为热泵系统中制冷剂的循环流量, kg/s ; h_{out} 为冷凝器出口焓值, J/kg ; A_c 为冷凝器换热面积, m^2 ; T_2 为压缩机出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_3 为冷凝器出口温度, $^{\circ}\text{C}$; k_3 为冷凝器换热系数, 通常以 R22 为制冷剂的套管式冷凝器的传热系数在 $800 \sim 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 本文 k_3 取 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

2.2 经济分析模型

对于 SLGHP 与热泵联合组成的系统, 主要考虑初始固定资本投资、年运行成本、年均总成本和投资回收年限等技术经济指标, 基于经济指标建立经济性模型, 如图 3 所示, 该组合系统主要包括地下 SLGHP 采热系统和地面热泵系统。

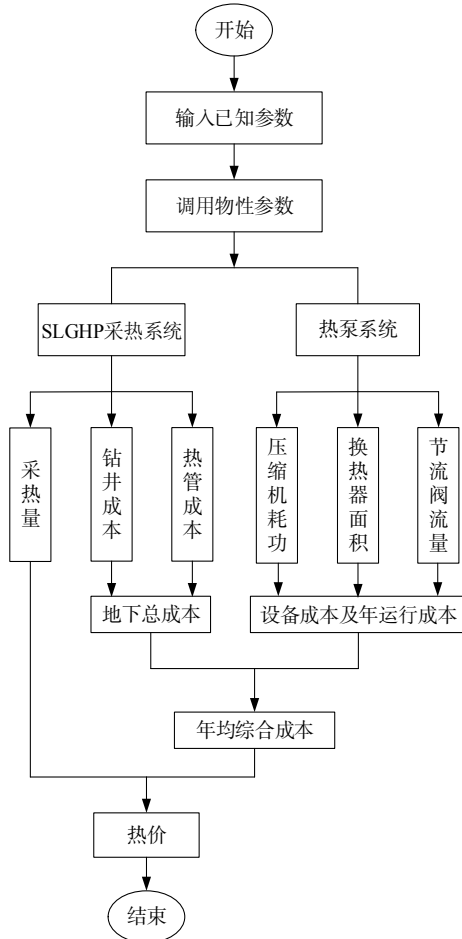


图3 经济性计算模型

对于 SLGHP 采热系统, 主要包括钻井成本和热管成本, 其中钻井所需要的费用不仅与打井深

度有关, 还与钻井位置等因素有关, 通过拟合, 可以得到一口井的钻井成本 C_w 约为:

$$C_w = U_d \cdot \frac{H(H+1000)}{2000} \quad (13)$$

式中: U_d 为单位钻井成本, 通过拟合可得到其为 1000 元/m ; H 为钻井深度, m 。

而 SLGHP 本身所需总成本 C_p 为:

$$C_p = U_p \cdot L \quad (14)$$

式中: U_p 为单位重力热管成本, 根据热管市场价格可以确定其为 600 元/m 。

根据调研市场组件的价格, 通过函数拟合可以得到热泵系统中压缩机成本 C_{comp} 、蒸发器(列管式换热器)成本 C_{evap} 、冷凝器(套管式换热器)成本 C_{cond} 及节流阀成本 C_{val} , 可分别按下式计算:

$$C_{\text{comp}} = 4928.2 \ln(W_{\text{comp}}) - 5393.2 \quad (15)$$

$$C_{\text{evap}} = 649.41 A_c^{0.7148} \quad (16)$$

$$C_{\text{cond}} = 1286.4 A_c^{0.9933} \quad (17)$$

$$C_{\text{val}} = 401.92 m_q + 447.76 \quad (18)$$

式中: W_{comp} 为压缩机耗功, kW ; m_q 为节流阀的质量流量, kg/s 。

假设安装费、管道费等其他费用占热泵系统成本的 15% , 则初始固定资本投资 C_{FCI} 为:

$$C_{\text{FCI}} = C_{\text{wp}} + 1.15(C_{\text{comp}} + C_{\text{evap}} + C_{\text{cond}} + C_{\text{val}}) \quad (19)$$

式中: C_{wp} 为钻井及重力热管成本之和, 元。

假设年利率为 5% , 井的运行年限为 50 年 ^[18], 资本回收系数 f_{CR} 为:

$$f_{\text{CR}} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (20)$$

式中: i 为年利率; n 为运行年限, 年。

整个系统的运营成本包括年电力成本、维护成本及管理成本。以北京为例, 根据北京 2022 年电费收取标准, 电费为 $0.488 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 由《北京市供热采暖管理办法》可知, 北京市供暖期为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日, 为期 4 个月, 按照 120 天进行计算, 则压缩机耗电费用可按下式计算:

$$C_{\text{ele}} = e \cdot t \cdot W_{\text{comp}} \quad (21)$$

式中: e 为电价, $\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; t 为压缩机运行时间, h 。

设定热泵系统的维护费 C_{MC} 占热泵系统总成

本的1%,其管理费 C_{MC} 占维护费的2.5%,则:

$$C_{MC} = 0.01(C_{comp} + C_{evap} + C_{cond} + C_{val}) \quad (22)$$

$$C_{MG} = 0.025C_{MC} \quad (23)$$

结合以上可以得出年运营成本 C_{AOC} 为:

$$C_{AOC} = C_{ele} + C_{MC} + C_{MG} \quad (24)$$

年均综合成本 C_{tot} 为:

$$C_{tot} = f_{CR} \cdot C_{FCI} + C_{AOC} \quad (25)$$

对于投资回收年限的计算,假设银行的年利率为 i ,则第 y 年应还银行的金额 C_{pay} 为:

$$C_{pay} = C_{FCI} \cdot i(1-i)^{y-1} \quad (26)$$

投资回收年限可按下式计算:

$$y = \frac{C_{FCI} + \sum_{i=1}^y C_{pay}}{S - C_{AOC}} \quad (27)$$

式中: y 为投资回收年限,年; S 为每年热量售价,元。

3 结果与讨论

本文计算涉及的参数均以所取经验值为基准,若改变某个参数,则其余参数保持不变,进而研究该参数与系统热力经济性之间的相互关系。

3.1 蒸发温度与成本关系

在地温梯度为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 时,对于 3000m 深度的井,分析发现蒸发温度在一定范围变化时,单位时间内压缩机耗功及冷凝器放热量都在不断下降,如图4所示,这主要归因于压缩机压比的降低。系统 COP 的变化如图5所示,COP 随蒸发温度的升高而不断增加,其原因为随着蒸发温度的升高,蒸发压力升高,压缩机压比降低,压缩功耗减小,虽然冷凝器放热量也减少,但是降幅小于压缩机功耗的减少,导致 COP 逐渐变大。图5展示了供热成本的变化规律,呈现先降低后升高的趋势,在该条件下,供热成本最低时所对应的蒸发温度(即最佳蒸发温度)为 -2°C ,这是由于随着蒸发温度降低,虽然温差逐渐增大使得系统传热量增加,但是蒸发温度降低会使得热泵系统压缩机压比增加,即压缩机功耗逐渐增加进而使年均综合成本增加,因此存在最佳蒸发温度使得供热成本最低。

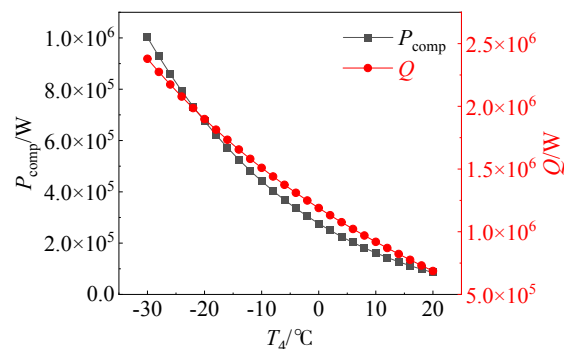


图4 单位时间内蒸发温度与压缩机功耗、冷凝器放热量的关系

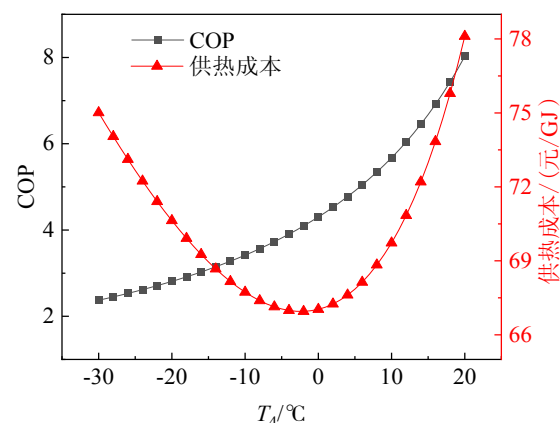


图5 蒸发温度与 COP、供热成本的关系

3.2 不同热阻与成本关系

在地温梯度为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 时,对于 3000m 深度的井,对比研究 SLGHP 热阻分别为 R_1 ($1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$)、 R_2 ($3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$) 及 R_3 ($5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$) 时,蒸发温度与供热成本的关系,如图6所示。随着蒸发温度的升高,热阻分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 时,供热成本均先降低后升高,对应的最佳蒸发温度分别为 -2 、 -10 、 -17°C ,此时供热成本分别为 66.9 、 76.3 、 84.2 元/GJ。在同一蒸发温度下,热阻越小,其供热成本越低。当热阻越小时,其最佳蒸发温度越高且所对应的供热成本越小。供热成本先降低后升高主要是由于随着蒸发温度的降低会使得压缩机功耗逐渐增加,导致年均综合成本增加。在初始阶段,降低蒸发温度有助于增加传热量,但低于最佳蒸发温度后,增加的功耗会导致成本的增加超过传热量的增加,从而使得供热成本又升高。同一蒸发温度下,当热阻减小时,热管传热量增加,而打井成本及热管成本不变,因此热

阻越小,供热成本越低。在换热量相同的情况下,降低蒸发温度,有助于热管传递热量,但是蒸发温度越低,压缩机功耗越大,年均综合成本越高,因此热阻越大最佳蒸发温度越低且所对应供热成本越高。

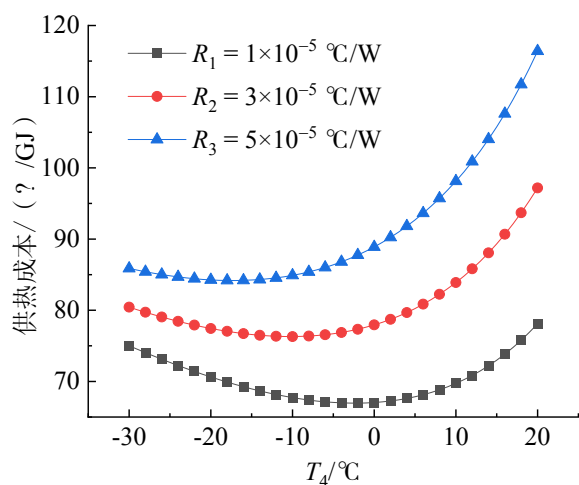


图6 不同热阻下蒸发温度与供热成本关系

3.3 不同地温梯度与成本关系

在井深为3000m时,研究了不同地温梯度与供热成本的关系,当地温梯度从 ΔT_1 (20℃/km)变化到 ΔT_5 (60℃/km)时,蒸发温度与供热成本的关系如图7所示。研究发现,地质条件越好的地方,其地温梯度越大,则供热成本相对越低。通过比较发现在同一蒸发温度下,地温梯度为60℃/km即地温梯度越大时,供热成本越低。当蒸发温度在-30~20℃之间变化,地温梯度分别为20、30及40℃/km时,供热成本先降低后升高,其最佳蒸发温度分别为-15、-2和10℃,其所对应的热量成本分别为76.2、66.9和58.1元/GJ;当地温梯度为50℃/km和60℃/km时,供热成本逐渐降低,其最佳蒸发温度应高于20℃。综上,同一蒸发温度下,地温梯度越大,供热成本越低,这主要是由于地温梯度越大,热管采热量越多。地温梯度越大,最佳蒸发温度越高且所对应供热成本越低,这主要是在换热量相同的情况下,降低蒸发温度有助于热管传递热量,但是蒸发温度降低会使得压缩机功耗逐渐增加,进而使年均综合成本增加。

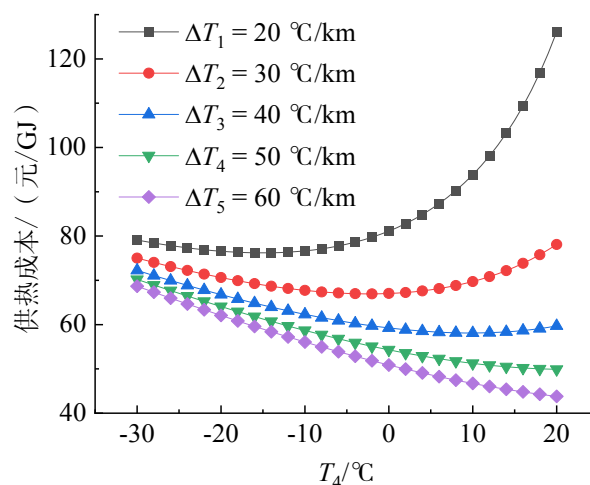


图7 不同地温梯度下蒸发温度与供热成本关系

3.4 不同井深与成本关系

在地温梯度为30℃/km时,研究了不同井深与供热成本的关系,当井深从 H_1 (3000m)到 H_5 (7000m)变化时,蒸发温度与供热成本的关系如图8所示。研究发现,对于3000、4000、5000、6000及7000m深度的井,随着蒸发温度的升高,供热成本都是先降低后升高,所对应的热量成本最低分别为66.9、66.4、66.3、66.5和67.0元/GJ,其所对应的最佳蒸发温度逐渐升高,分别为-2、3、8、12和15℃,即随着井深度的增加,其最佳蒸发温度逐渐升高。

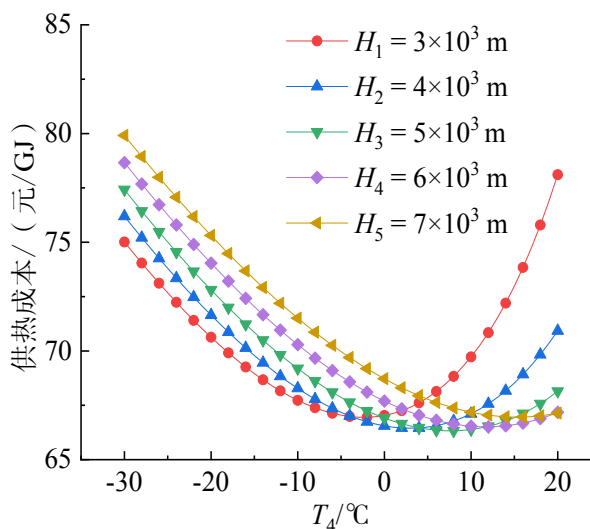


图8 不同深度下蒸发温度与供热成本关系

图9描述了在最佳蒸发温度的情况下,不同井深与供热成本的关系,从图中可以发现井深为5000m时,供热成本最低。并非井越深供热成本越低,这一现象主要与打井成本和采热量这两个因素有关,井越深打井成本就越高,能开采的热量也相对越高,但当初投资过大,打井成本远大于所能开采的热量,就会出现井很深但供热成本却变高的问题,因此存在一个合适的井深使其经济性最佳。

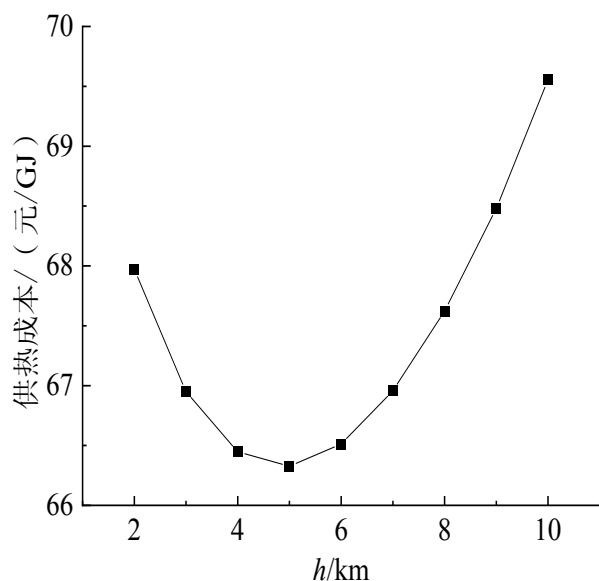


图9 最佳蒸发温度下不同井深与供热成本关系

3.5 不同蒸发器面积与成本关系

在地温梯度为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 时,对于 3000m 深度的井,对比研究了蒸发器面积分别为 $A_1(100\text{m}^2)$ 、 $A_2(200\text{m}^2)$ 及 $A_3(300\text{m}^2)$ 时,蒸发温度与供热成本的关系,如图10所示,所对应的热量成本最低分别为 66.2、65.4 和 65.1 元/GJ。研究发现蒸发器面积一定时,随着蒸发温度的升高,供热成本关系都是先降低后升高,在同一蒸发温度下,蒸发器面积越大,供热成本越低。这主要是由于随着蒸发器面积的增加,其从地层换取的热量更多,虽然蒸发器的成本增加,但是相对来说,带来了更好的经济效益。

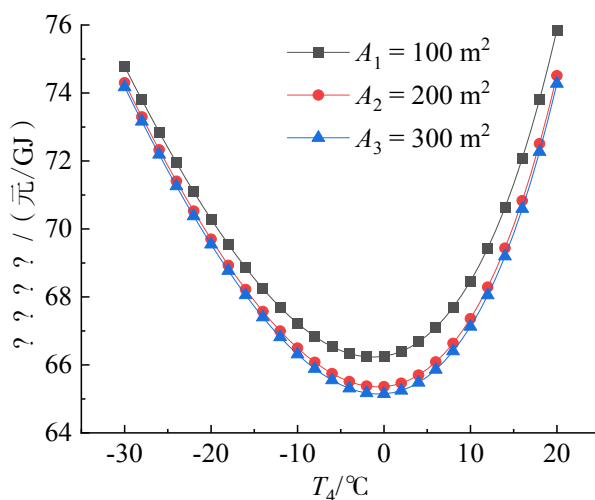


图10 不同蒸发器面积下蒸发温度与供热成本关系

图11描述了在最佳蒸发温度的情况下,不同蒸发器面积与供热成本的关系,图中可见蒸发器面积为 450m^2 时,供热成本最低,并非蒸发器面积越大供热成本越低。主要原因为蒸发器的面积与其成本及换热量有很大的关系,蒸发器面积越大成本就越高,能换出的热量也相对越高,但是当面积过大,将受限与热管与地层之间总的可换取热量,就会出现蒸发器面积很大,但是经济性一般的问题,因此存在一个合适的蒸发器面积使得其经济性最佳。

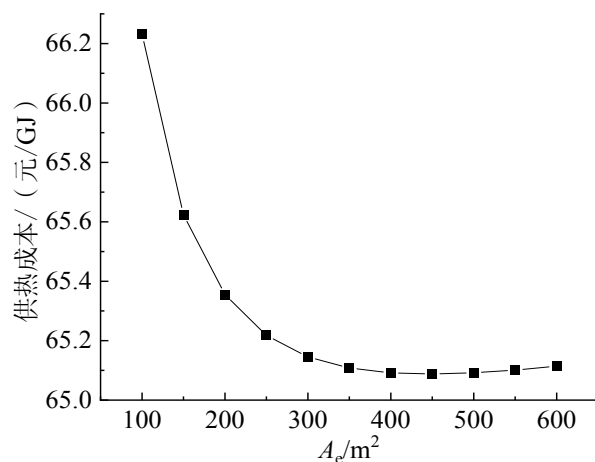


图11 最佳蒸发温度下不同蒸发器面积与供热成本关系

3.6 投资回收年限分析

对于 3000m 深度的井,初始固定资本投资主

要包括打井成本、热管成本及热泵机组成本,总的固定资本投资大概在800万,而每年所收取的热量费用与当地的地质条件有很大的关系,地温梯度与回收年限的关系如图12所示,可见地温梯度大回收年限越短,而如果有可以利用的废弃井,那么直接使用废弃井与热泵系统结合进行供热利用,可进一步缩短回收年限,因此利用SLGHP开采深层地热能并与热泵系统联合供热有很好的市场前景。

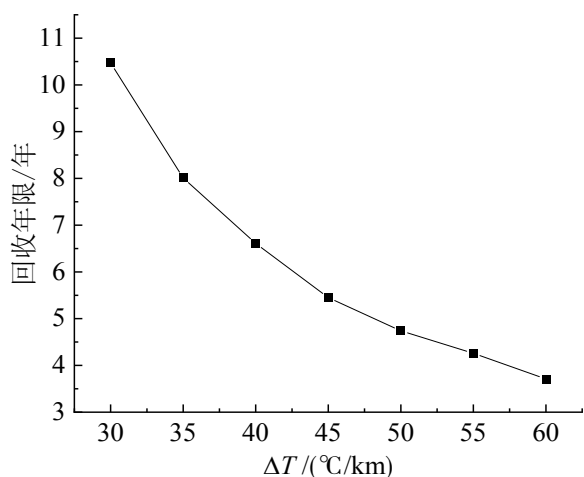


图12 地温梯度与回收年限关系

4 结论

将SLGHP与热泵系统结合,并对其热力经济

性进行了分析,讨论了系统热力性与经济性之间的关联性,为优化SLGHP与热泵的联合系统提供理论指导,并为实际工程应用中的设计决策和操作优化提供参考,得出以下结论:

(1)COP随蒸发温度的升高不断增大,供热成本随着蒸发温度的升高先降低后升高,蒸发温度维持在特定温度时,成本最低。在地温梯度 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、井深3000m的条件下,最佳蒸发温度是 -2°C 。

(2)SLGHP热阻越小时,其经济性能越好且最佳蒸发温度越高。地温梯度越大时,其经济性能越好且最佳蒸发温度越高。

(3)当井深度一定时,随着蒸发温度的升高,供热成本先降低后升高,且随着井深度的增加,其最佳蒸发温度逐渐升高;存在一个合适的井深度使得供热成本最低。

(4)当蒸发器面积一定时,随着蒸发温度的升高,供热成本先降低后升高,在同一蒸发温度下,蒸发器面积越大,供热成本相对越低;存在一个合适的蒸发器面积使得供热成本最低。

(5)利用SLGHP与热泵系统结合进行供热,具有很好的经济效益。投资回收年限与地质条件有很大关系,如利用废弃井,则将会进一步缩短回收年限。

转自《新能源进展》Vol 12 NO.2

地下含水层储能应用争议:如何划定管控红线?

地热知光年

想象一下,利用地下“天然保温瓶”冬存夏冷、夏蓄冬热,为建筑高效供能——这就是含水层储能(ATES)技术。自上世纪70年代在上海成功应用以来,它已在荷兰、德国等国大规模推广。其节能降耗效果惊人:建筑供暖节能50%以上、供冷节能80%以上,综合能源费用节省60%–70%,能效比

(COP)高达4(供热)甚至38(供冷),堪称建筑低碳转型的“利器”。

然而,在我国,ATES的发展却深陷争议与停滞。核心矛盾在于:严格的地下水资源保护、地面沉降防治与ATES必须取用/回灌地下水的特性之间,形成了巨大张力。早期“一刀切”式的管控,在

风险认知不明时或有其合理性,但在技术日臻成熟、“双碳”目标紧迫、城市精细化管理要求提升的今天,是否已滞后?我们亟需重新审视 ATES,科学划定“管控红线”,在守护地下水安全底线与释放技术巨大潜力之间找到平衡点。

一、核心价值再确认:ATES为何不可替代?

研究与工程实践反复验证了 ATES 的独特价值:

1. 大规模长时储能:完美解决建筑供冷供热季节性供需错配难题,这是短期储能技术无法企及的。
2. 超高效率与能效:COP 值碾压传统空调锅炉,运行成本极低(主要为水泵电耗)。
3. 零碳环保:无燃烧、无化学排放,是真正的清洁供暖/制冷方案。
4. 经济可靠:初始投资(钻井、设备)后,运营成本低,储能介质(水/岩层)近乎零成本,全生命周期经济性优异。
5. 资源禀赋匹配:众多城市区域拥有适宜的浅层含水层资源。

二、核心争议剖析:环境影响真的不可控吗?

争议焦点集中于 ATES 对地下水环境的潜在影响。然而,最新监测数据(如上海崇明岛项目)和先进技术提供了认知重构:

1. 水温变化:可控的局部扰动范围有限:温度影响被严格限制在“热井/冷范围有限:温度影响被严格限制在“热井/冷井”周围有限区域内(形成可预测的“热/冷羽”),不会无限扩散。精准预测:现代水文地质模型可提前数十年精确模拟温度场演变,指导优化设计。

物理可逆:系统停运后,温度会自然恢复,非化学污染。

物理可逆:系统停运后,温度会自然恢复,非化学污染。

2. 水质与地质稳定:风险显著降低

同层 100% 回灌:现代 ATES 强制要求抽灌同层、水量平衡,有效防止水层交叉污染和水化学失衡。闭式循环:减少水体与空气接触,降低氧化风险。

抽灌平衡:维持含水层压力,引发地面沉降的风险远低于传统地下水开采(上海项目实测沉降<

1mm/年)。

关键本质厘清:ATES 是地下水的“循环利用”而非“消耗开采”。水仅作为热量的载体,完成使命后即回灌原位。将针对“消耗型用水”的严格管理套用在“循环型用能”上,正是当前监管困境的根源之一。

三、管控困境:法规滞后与时代需求的鸿沟

当前 ATES 推广的最大障碍是现有法规标准严重滞后于技术发展:

“一刀切”式限制:饮用水源地保护区(尤其一、二级)、地面沉降防治区普遍禁止 ATES,未能区分“消耗型用水”与“循环型用能”,也未能充分考虑技术进步带来的风险可控性。这导致巨大的节能减排潜力被隐藏,技术创新受阻,与城市精细化、科学化管理方向不相符。

标准规范缺失:国家层面缺乏专门的 ATES 空间准入、技术审批和运行监管标准。审批部门只能参照传统“取水”法规,针对性差、尺度不一、审批无据,各方均陷于不确定性困境。

四、破局之道:构建科学动态的“管控红线”体系

借鉴国际经验(荷兰、德国)并结合国情,亟需建立一套基于科学风险评估、分区分类、动态监测的精细化管控框架:

核心原则:从“区域禁入”转向“风险管控”,从“一刀切”转向“一区一策、一项一评”。

1. 分区管控:明确空间边界与准入条件

建设区:饮用水源地一级保护区核心区、活动断裂带、地质灾害高易发区,零例外禁止。

限制建设区:饮用水源地二级保护区及缓冲区、地下水补给区、重要湿地/自然保护区周边、重要基础设施保护区;严格准入:强制高精度水文地质勘察与长期热运移模拟预测(如 50 年)、配套全自动实时监测(温/位/质)、确保“热羽不越界”、100% 同层回灌。

禁止建设区:饮用水源地一级保护区核心区、活动断裂带、地质灾害高易发区,零例外禁止。

要湿地/自然保护区周边、重要基础设施保护区;严格准入:强制高精度水文地质勘察与长期热

运移模拟预测(如50年)、配套全自动实时监测(温/位/质)、确保“热羽不越界”、100%同层回灌。

鼓励建设区:城市CBD、大型公建群、高新园区(非环境敏感区);积极引导,简化审批,优先纳入区域能源规划,鼓励“一井多用”(储能+应急水)。

2. 分类管控:按技术特性施策

低温系统($\leq 25^{\circ}\text{C}$):风险较低,在限制区可简化环评聚焦热影响)。

高温系统($> 25^{\circ}\text{C}$):风险较高(需关注岩土热膨胀),限制区禁止,鼓励区需严格单独审批论证。

区域级项目:优先支持,但需同步编制“热影响区域规划”,避免项目间热干扰。

3. 全生命周期监管:闭环管理,保障安全

设计阶段:强制第三方验证热模型、设定井距/井深标准(防热干扰/防串层)、评估与地铁/管廊等地下设施的空间关系。

施工阶段:钻井录像存档、回灌水质预处理达标认证、邻近敏感设施时采取保护措施。

运行阶段:实时动态监测是关键!每月提交报告,地表变形超阈值或水质异常即自动预警停运。建立与地下重要设施的协同监测网,数据共享至城市地下空间平台。

退役阶段:规范封井、开展3年环境跟踪监测,评估对邻近设施影响。

关键支撑体系:

填补标准空白:急需制定《地下含水层储能系统技术规范》,明确选址要求(如与敏感设

施的最小安全距离)、监测指标阈值、运行管理规程等。

建设智能监管平台:整合水文地质数据、ATES项目地图、地下空间设施档案,开发“热影响模拟+空间冲突预警”模块,实现审批科学化、监管可视化。

建立跨部门协同机制:明确自然资源(地质安全/空间协调)、生态环境(水质)、住建(地下设施安全)、能源(技术推广)等部门权责。

结语:科学理性,破局未来

含水层储能(ATES)已非昔日“洪水猛兽”。技术进步赋予了我们精确预测和控制其环境影响的强大能力。如今,限制其发展的瓶颈,已从技术转向认知与管理。在严守地下水安全底线的前提下,通过建立科学的风险评估体系、实施分区分类的精细化管理、填补标准空白、强化全生命周期监管、推动跨部门协作,我们完全能够为这项宝贵的零碳储能技术开辟广阔的发展空间。

这不仅是为了释放技术潜力、加速城市绿色低碳转型,更是践行中央城市工作会议精神,提升城市治理科学化、精细化、智能化水平的生动实践。

期待各方携手,共同绘制一条既能牢牢守护地下水资源安全红线,又能充分赋能城市可持续发展的科学路径。

文中素材引自政府网站、专业数字媒体和权威文献出版机构

全球十大地热电站项目介绍

在全球脱碳竞赛中,太阳能板和风力涡轮机常常成为人们关注的焦点。然而,在地球表面之下,存在着一种强大、持久且经常被忽视的能源转型英雄:地热能源。与其间歇性能源不同,地热能

可提供稳定的基荷电力。目前,全球已安装的地热发电容量已达16,873兆瓦,可再生能源正逐步成为拥有适宜地质条件国家的能源战略支柱。但地热能的发展并不均衡。主要集中在少数大项目

上,这些巨无霸项目占据了全球产能份额。因此,这些国家的投资环境、能源政策和技术水平,对整个行业的发展产生着巨大影响。

全球十大地热产能排名:

10. 印尼达拉贾特发电站 (Darajat Power Station)

- 运营商:Star Energy Geothermal
- 总部:印尼雅加达
- 首席执行官:Hendra Soetjipto Tan

位于西瓜哇,达拉贾特总装机容量 271 兆瓦,由三个单元构成:55 MW、95 MW 和 121 MW,自 1994 年起运行。显著特点是采用干蒸汽发电——这是地热发电最原始也是最直接的形式,即将地下储层中的蒸汽直接导入汽轮机。该技术效率极高,但地质条件苛刻,全球采用此技术的极少,使达拉贾特成为全球地热领域的“稀有物种”。

9. 菲律宾蒂维地热综合体 (Tiwi Geothermal Complex)

- 运营商:AboitizPower(通过其子公司 AP Renewables, Inc.)
- 总部:菲律宾
- 首席执行官:Danel C. Aboitiz

作为菲律宾首座且历史悠久的地热电站,蒂维电站堪称东南亚可再生能源里程碑。该设施建于 1979 年,位于阿尔拜省,总装机容量 289 兆瓦,四十多年来一直是电网的中坚力量。

其中二元循环机组使用一次闪蒸后的高温卤水为次级流体加热,使其蒸发推动涡轮,从而在不钻新井的情况下进一步发电。这一技术大幅提升了整体发电效率。

8. 冰岛赫利谢迪电站 (Hellisheidi Power Station)

- 运营商:雷克雅未克能源公司 (Orkuveita Reykjavíkur),通过其子公司 ON Power
 - 总部:冰岛雷克雅未克
 - 首席执行官:Sævar Freyr Þráinsson
- 赫利谢迪电站坐落于亨吉尔火山顶部,是地

热工程的奇迹。其电力输出为 303 兆瓦,同时为区域集中供热系统提供 400 兆瓦热能,是冰岛最大的地热电站。其全球意义还在于率先实现了碳捕集与矿化。再相同地点的 Climeworks 设施将捕获的 CO₂注入火山玄武岩中,使其矿化为岩石,从而使该项目成为负排放能源生产的蓝图。

7. 印尼萨鲁拉地热电站 (Sarulla Geothermal Power Plant)

- 运营商:Sarulla Operations Ltd.
- 总部:印尼雅加达
- 首席执行官:Taku Kimura

位于苏门答腊北部的萨鲁拉项目装机容量为 330 兆瓦,是全球最大的地热电站之一,也是现代项目融资的典范。该项目分三期建设,于 2017 - 2018 年间逐步投入运营,为逾 200 万户家庭供电。

其开发历程跨越数十年,最终由包括 Medco Power、Ormat、伊藤忠和九州电力在内的国际联合体推动实施。该电站采用先进的综合循环技术,能同时高效提取蒸汽与卤水中的热能。

6. 美国萨尔顿海地热区 (Salton Sea Geothermal Area)

- 运营商:Berkshire Hathaway Energy,通过其子公司 CalEnergy Operating Corporation
- 总部:美国爱荷华州得梅因
- 首席执行官:Scott W. Thon

位于南加州帝国谷的萨尔顿海地区拥有 345 兆瓦的发电能力,是创新前沿的热土。

该区域自 1982 年起由 BHE Renewables 运营,由 10 座电厂组成。

该项目的全球战略意义在于率先开发地热卤水中的直接锂提取(DLE)技术。其高盐卤水富含锂,BHE 正在开发工艺,力求实现电池级锂与清洁电力的联产,使萨尔顿海项目站上新能源与电动汽车供应链的交汇点。

5. 印尼古农萨拉克地热站 (Gunung Salak)

- 运营商:Star Energy Geothermal
- 总部:印尼雅加达

·首席执行官:Hendra Soetjipto Tan

该项目装机容量达377兆瓦,是印尼最大的地热项目,对国家电网意义重大。

地处西瓜哇火山带,该站自1994年起陆续建设六个机组。

与达拉贾特类似,该项目曾由雪佛龙开发,后由Star Energy收购,标志着印尼地热资源向本土化整合迈进。近期新增的三元循环机组彰显其持续优化战略。

4. 菲律宾麦克班地热综合体(Mak-Ban)

·运营商:AboitizPower(通过其子公司AP Renewables, Inc.)

·总部:菲律宾全球城

·首席执行官:Daniel C. Aboitiz

Makiling-Banahaw(简称Mak-Ban)是菲律宾能源体系的支柱之一,装机容量达458兆瓦。与蒂维项目同年(1979年)投产,在巩固菲律宾地热强国地位中发挥重要作用。

该综合体跨越两个省份,共设六座电厂,采用单、双闪蒸技术和部分二元循环,既有国家投资背景,也实现向私营运营模式的转型,成为大型地热资产持续产能管理的典范。

3. 墨西哥塞罗普列托电站群(Cerro Prieto)

·运营商:墨西哥联邦电力委员会(CFE)

·总部:墨西哥城

·首席执行官:Emilia Esther Calleja Alor

总装机容量高达820兆瓦,塞罗普列托电站群无疑是一座能源巨擘。项目共设五座主电站(CP1至CP5),自1973年起分阶段建设,采用主要的闪蒸技术。

该项目完全由墨西哥国有电力公司CFE控制,代表了一种典型的国家主导能源模式,与菲律宾的公私合营和美国的企业运营模式形成鲜明对比。

其独特地质背景——处于大陆扩张断层带——提供了强大且稳定的热

2. 意大利拉德雷洛地热综合体(Larderello)

·运营商:意大利国家电力公司Enel(旗下Enel Green Power)

·总部:罗马

·首席执行官:Salvatore Bernabei

位于意大利托斯卡纳的拉德雷洛综合体,是地热发电的发源地,也是该行业的“活化石”。其由34座电厂组成,总装机容量769兆瓦,是欧洲最大的地热项目。

其历史可追溯到1904年,当时的亲王Piero Ginori Conti首次用地热蒸汽点亮了5盏灯泡;1913年建成第一座商业电站。

如今由Enel Green Power运营,拉德雷洛大约贡献了全球10%的地热电量,为数百万用户提供电力和供热。

1. 美国间歇泉地热综合体(The Geysers)

·运营商:Calpine Corporation

·总部:美国德克萨斯州休斯顿

·首席执行官:Andrew Novotny

坐落于加州Mayacamas山脉,占地45平方英里,The Geysers是全球最大的地热发电区。由18座发电厂组成,装机总容量超过1,500兆瓦,堪称地热界的无冕之王。

主要由Calpine公司运营,该项目可为一个旧金山大小的城市提供稳定电力。

更令人称道的是其资源可持续管理模式:项目引入了城市污水处理后的再生水,每天注入数百万加仑,用于补充蒸汽储层,确保其长期供能能力,为北加州绿色经济持续赋能。

信息来源:《能源数字》

获国家科技重大专项和国际大陆钻探计划支持 渭河盆地万米深钻计划启动

中国可再生能源学会地热专委会 报

7月28日,记者从中国科学院地球环境研究所获悉,中国深地国家科技重大专项、国际大陆钻探计划(ICDP)和国家自然科学基金委员会、中国科学院联合资助的中国“渭河盆地特深科学钻探计划”(“渭河盆地深钻计划”),当天在陕西渭南举行第一期工程钻探现场研讨会,标志着“渭河盆地深钻计划”正式启动实施。

“渭河盆地深钻计划”第一期工程钻探现场研讨会会场。中国科学院地球环境研究所供图“渭河盆地深钻计划”由中国科学院地球环境研究所安芷生院士联合美国、瑞士、澳大利亚等多国科学家共同发起,将在渭河盆地开展环境钻探,通过获取超万米岩心,系统研究岩石圈、水圈、生物圈的协同演化过程,揭示新生代东亚气候环境演变规律,评估地热与氦气资源潜力,以满足国家深地战略的重大需求。

“渭河盆地深钻计划”分两个阶段实施,目前开展的为第一阶段工程,计划获取上部3000米沉积地层,重建晚中新世以来东亚多尺度水文气候变率及全球联系;第二阶段将获取盆地超万米完整的沉积记录,揭示新生代季风演化过程及其与青藏高原-秦岭隆升的耦合关系,评估深部地热和氦气资源潜力。

渭河盆地位于中国黄土高原与秦岭造山带之间,保存了超7000米的巨厚细粒河湖相沉积,是世界一流的开展新生代(距今6600万年以来)气候环境变化、构造-气候相互作用、地球人类宜居性的

理想场所。专家表示,渭河盆地深钻研究,有望建立新生代气候全球环境变化的陆相“金钉子”。

此次“渭河盆地深钻计划”钻探现场研讨会,旨在推进深地国家科技重大专项第一期选址工程与国际大陆钻探计划“渭河盆地深钻计划”的顺利实施,研讨环境钻探获取岩心方案与测井监测关键技术,确保获取3000米高质量岩心。

深地国家科技重大专项副总师侯增谦院士,渭河深钻项目首席科学家安芷生院士,渭河深钻项目科学顾问周卫健院士、张培震院士、彭建兵院士、谢树成院士、董树文教授,国际大陆科学钻探计划执委会会员吕庆田研究员等专家,参加了现场研讨会。

项目负责人中国科学院地球环境研究所孙有斌研究员介绍说,“渭河盆地深钻计划”第一期工程启动,旨在深入实施国家“三深一系统”(深地、深海、深空和地球科学系统)的地球科学发展战略,意味着特深科学钻探项目选址工程进入关键实施阶段,后续将通过获取高质量岩心资料,开展相关科学研究,服务于国家深地战略的实施与地球系统科学的发展。据了解,“渭河盆地深钻计划”得到陕西省自然资源厅、渭南市政府、中国地调局西安地调中心、陕西省地质调查研究院、陕西省地震局等单位大力支持。其深钻一期钻探工程,由中国科学院地球环境研究所和山东省第三地质矿产勘察院联合实施。

信息来源:中国新闻网