

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	目 次 2025年第4期
	学 术 论 文 华北中东部高温地热能成因机制 康凤新等（3） 中深层地热能供热技术在供热项目的应用袁丽娜等（18） 跨越三种孔隙度地层的垂直裂隙对有机朗肯循环地热发电性能影响高翔等（22）
	综 述 地热发电潜力几何？技术经济评估与国别潜力解析 史田宇等（29）
	报 导 西安石油大学—西咸能源地热工程及储能技术应用基地揭牌成立中国可再生能源学会地热专业委员会（31） 中国石化部署实施地热井超1800口 中国石化报（31） 中企在全球首次执行的一次闪蒸地热电站EPC项目顺利取得完工证书 中国可再生能源学会地热能专委会（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

CONTENTS

No.4 2025

Academic Articles

- The genesis mechanism of high-temperature geothermal energy in the central and eastern parts of North China
..... Fengxin Kang et al.(3)
- Application of medium-and-deep geothermal energy heating technology in heating projects
.....Lina Yuan et al.(18)
- The impact of vertical fractures along three different porosity layers on the performance of organic Rankine cycle geothermal power generation
.....Xiang Gao et al.(22)

Review Articles

- What is the potential of geothermal power generation? Techno-economic evaluation and analysis of different countries’ potential
..... Tianyu Shi et al. (29)

News

- Xi'an University of Petroleum-Xixian Energy Group Geothermal Engineering and Energy Storage Technology Application Base was unveiled and established
..... Geothermal Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society (31)
- Sinopec deploys over 1800 geothermal wells for implementation
..... Sinopec News(31)
- The EPC project of a single-flash geothermal power plant executed by a Chinese enterprise for the first time in the world has successfully obtained the completion certificate
..... Geothermal Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society(32)

华北中东部高温地热能成因机制

康凤新^{1,2}, 张保健^{3,*}, 崔洋⁴, 姚松⁴, 史猛⁵, 秦鹏⁶, 隋海波⁴,
郑婷婷^{1,2}, 李嘉龙^{1,2}, 杨海涛^{1,2}, 李传磊⁴, 刘春伟⁴

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 中国地质科学院, 北京 100037

4 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014

5 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264000

6 山东省国土空间生态修复中心, 山东 济南 250014

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球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

国际上关于高温地热能成因机理的研究主要聚焦于全球板缘和火山地震带,沉积盆地型高温地热能成因机理的研究较薄弱。中国已发现的150℃以上的高温地热资源主要分布在地中海—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等地;高温地热

资源成因机制的研究主要集中于青藏高原及周边地区。多吉研究了西藏典型高温地热系统—羊八井热田的地质特征。孙红丽研究了西藏高温地热田地球化学特征。周总璞等分析了西藏高温地热资源分布特征。张森琦等、Lin等、张保健等提出了青藏高原东北部共和盆地干热岩和高温地热资源的成因机制与赋存特征。上官志冠、Guo等研究

了云南腾冲高温地热田的热储结构与成因特征。

随着探测深度加大与研究的不断深入,中国中东部地区高温地热资源探测近年来取得突破。2019年在河北省马头营3965m深度钻获151℃的高温花岗岩体,2020年在山西省大同市天镇县1586m深探获了温度为167℃的高温地热流体,2021年在江苏省苏北盆地孔深4701.68m处探获了温度为155℃的寒武系奥陶系碳酸盐岩岩溶热储,2023年在山东省东营市桩西地区4283m深钻获167.5℃的奥陶系灰岩岩溶热储。随着高温地热探测的不断突破,对于高温地热资源成因机制的研究也开始增多。张保健等研究了河北省马头营干热岩的成因机制。王思琪等研究了雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山的聚热机制。鲁辉研究了苏北盆地碳酸盐岩高温热储层的地质特征。康凤新等、谭志容与康凤新和赵季初等揭示了渤海湾盆地临清拗陷、临清拗陷东部、梁村潜山和孤岛潜山岩溶热储聚热机制,评价其热能量与地热流体资源量发电潜力分别为 13.5×104 、 9.42×104 、10和95MW。

本文以大同天镇高温地热田、马头营干热岩和桩西潜山高温地热区为例,探究华北克拉通破坏(图1)导致的深部壳幔热物质上侵、岩石圈减薄等深部地质作用对形成地壳浅部高温热异常作用的动力学过程,阐释地球内外力地质作用对地球浅部高温地温场的塑造与热异常制约机制,揭示典型地段高温地热资源的成热机制,并阐明其对华北中东部高温地热能探测的指示意义。

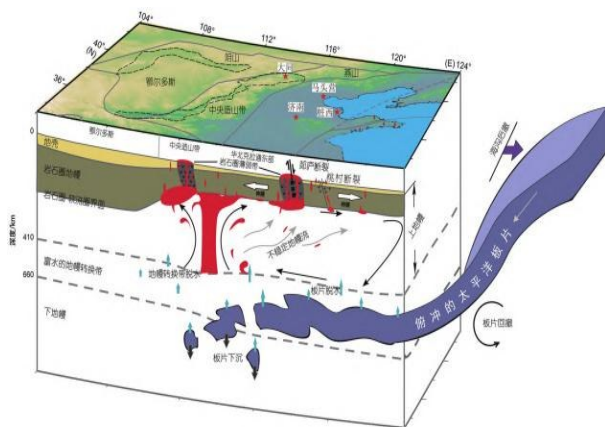


图1 华北克拉通破坏的地球动力学过程与中东部减薄的地壳和岩石圈及大同-马头营-桩西高温热储分布图(据文献修改)

1 地质构造背景

华北中东部在大地构造上处于华北板块的东部,自西向东主要包括山西断陷带、太行山隆起、燕山隆起、华北平原和渤海湾海域区(图2)。

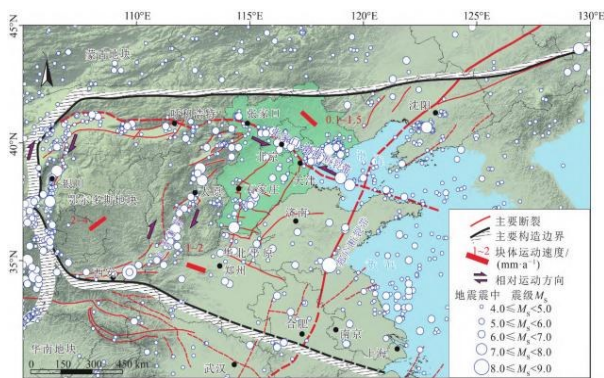


图2 华北地区活动构造简图(据文献修改)

1.1 主要构造区

(1)山西断陷带。山西断陷带地处印欧板块与太平洋板块相互作用的区域,是中国东、西部大地构造的分界带和解耦带,也是鄂尔多斯、华北等构造块体差异运动的构造调节带。山西断陷带北段以盆岭构造地貌为特征,断陷盆地主要受到北西倾的正断层控制,在山西北部的阳原盆地和大同盆地,发育中更新世幔源基性火山岩,以橄榄玄武岩和玄武岩为主。

(2)太行山隆起。太行山隆起为纵贯华北地区中部的北北东向巨型隆起构造带,东以太行山前断裂为界与华北平原沉降区相邻。结晶基底由太古宇和古、中元古界岩系所构成。太行山北部因第四纪强烈伸展动力地质作用而发育断陷盆地,成为山西地堑系北段的组成部分。

(3)燕山隆起区。燕山隆起区位于阴山隆起区以南,西南端于涿州一带与太行山隆起区相连。太古宙结晶基底广泛出露。新元古代急剧下沉,盖层发育,沉积了近万米厚的震旦系地层。北部地区的二级夷平面与早更新世末至中更新世初形成的三级夷平面,反映了该地区第四纪以来仍处于上升活动中。

(4)华北平原区。华北平原区北部包括京津

冀鲁豫平原地区。盆地北缘与燕山隆起交接,由一系列NE向断陷盆地和控盆断裂组成。平原地区新构造组合较复杂,控盆断层的活动主要发生在早、中更新世,伸展方向为NWW-SEE向。晚更新世—全新世时期,断层活动以张扭为主,NNE向断层右旋走滑,NW向断层左旋走滑。

(5)渤海海域区。渤海海域与华北平原一样经历了相同的新生代裂谷作用,但第四纪渤海海域构造样式与陆域截然不同,该海域不仅成为新构造运动的中心,渤海周缘发育中更新晚期(800~600ka)和晚更新世晚期(约40ka)幔源火山活动。晚更新世全新世渤海地区至少发生过5~6次规模较大的海侵事件,海陆相地层交互沉积,记录了地壳上拱运动。

1.2 主要断裂构造

(1)山西断陷带。新生代以来,深部挤压,隆起区的轴部表层张裂,产生平移正断层,发生垂直沉降运动,伴随出现了断陷盆地。从南部运城到北部大同一带,发育一系列不同时期的超基性岩和基性岩侵入体,在大同地区见有第四纪玄武岩。在山西的许多断陷盆地的边缘和内部可见新生代断层。

(2)太行山山前断裂带。太行山山前断裂带是西部隆起和东部平原的边界构造带,向北经邯郸、邢台至石家庄,走向为NNE;从石家庄向北转为NE向,向保定、涿州方向延伸。断裂带西侧的太行隆起带,主要是前震旦纪变质岩和下古生界复式背斜。背斜顶部中生代沉积基本缺失,新生代继续隆起并产生断陷。

(3)张家口—渤海断裂带。该断裂带以张家口张北西部为起点,经怀来、唐山等地穿过渤海向南东延伸至烟台和蓬莱以北至黄海,全长约700km,整体呈NW向展布,构造带宽度最大可达190km左右(图1)。新近纪以来,尤其是第四纪,区域构造应力场转变为NEE向挤压,表现为左行走滑剪切活动,切割NE向构造,形成控制华北断陷盆地北缘的区域性断裂构造带,也是中国著名的强震集中带。

(4)郯庐断裂带。郯庐断裂带是华北和华南地块的走滑边界断裂,发育一系列韧性剪切变形构造。该断裂带主体形成于晚白垩世,在新近纪

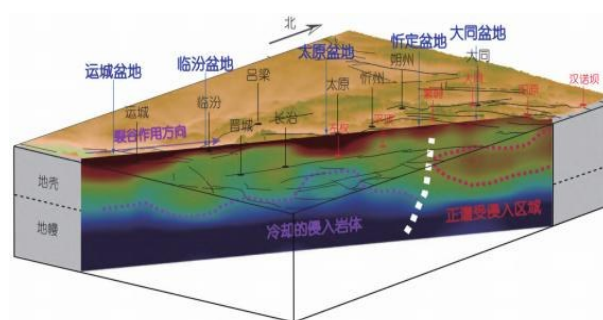
晚期发生挤压走滑活动,形成了正花状构造。北部苏—鲁段的强度大,发育了一系列与走滑活动有关的新构造现象,如挤压隆起、拉分盆地、冲沟错断等,是一条规模巨大的控震断层。断裂带内前新生代地层因受侧向挤压而褶皱隆起成丘,北段有相当规模的新生代喷发岩类。

1.3 火山活动

华北地区新生代玄武岩喷发活动主要有3期,其中以新近纪时期最盛。北部隆起区已发现玄武岩和火山堆积多处。如汉诺坝新生代玄武岩、凝灰岩和火山碎屑的堆积。大同盆地和阳原盆地发育橄榄玄武岩和玄武岩等中更新世幔源基性火山岩(图3)。

第四纪火山岩在华北也有零星出露,包括山西大同、山东无棣大山和安徽女山玄武岩等。综合测年将华北地区第四纪火山活动分为早更新世早期(约2.36Ma)、早更新世晚期(约1.34Ma)、中更新世早期(0.80~0.60Ma)、中更新世晚期(0.20~0.13Ma)和晚更新世晚期(0.07~0.035Ma)等5期;其中,山西大同火山群(约0.68Ma)、山东无棣大山玄武岩(约0.73Ma)和山东蓬莱玄武岩(约0.84Ma)等为中更新世早期典型代表^[4]。

北纬39°以北大同火山区的低速异常从地幔顶部一直向上延伸至中地壳,并由西向东转移,清晰地显示了地幔岩浆上涌的特征;北纬38°以北大范围的低速区,推测是大同火山地区来自上地幔高温玄武质岩浆上涌底侵,导致地壳升温乃至部分熔融造成的(图3)。



红色—发现幔源包体残留的地点;红色虚线—正在遭受岩浆岩侵入;紫色虚线—已经冷却的古近纪早期底侵岩浆岩;白色虚线—南北分界线。

图3 山西断陷带形成的深部动力学背景示意图(据文献修改)

2 高温地热探测

2.1 大同盆地天镇高温片麻岩裂隙热储

山西大同天镇县钻获的高温高压地热流体钻孔GR1,构造单元上位于大同新生代断陷沉积盆地。大同盆地分布有自新近纪至第四纪晚更新世喷发的大同火山群玄武岩,最近一期活跃期为0.09Ma。根据GR1钻孔资料(图4),0~286.5m深处主要为黏土层盖层,地温梯度较大,为 $21.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$,是其下部存在热对流热源对上部盖层产生“烘烤”作用所致。深286.5~1297m为新太古代变质岩,地温梯度 $5.15^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$,在该深度区段岩石完整,未见破碎带,不含地热流体,温度随深度平稳线性增加,热量传递以热传导方式为主,地温梯度比较稳定。1297~1500m深处同样未见断裂和地热流体,岩石完整,构成下部高温裂隙热储的盖层,地温梯度陡增至 $16.01^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$;其形成机制:随着钻探深度的增加,愈加接近深部导热断裂通道和深部高温流体上涌富集带,该深部热源持续加热其上部完整岩石而形成高地温梯度盖层。GR1孔在钻进至深1622m时,突然探获高温高压地热流体;于孔深1586m处测得温度为 167°C ,焖井状态下井口稳定压力为1.12MPa;放喷状态下井口稳定压力为0.8MPa,井口稳定温度高达 160.2°C ,稳定流量为

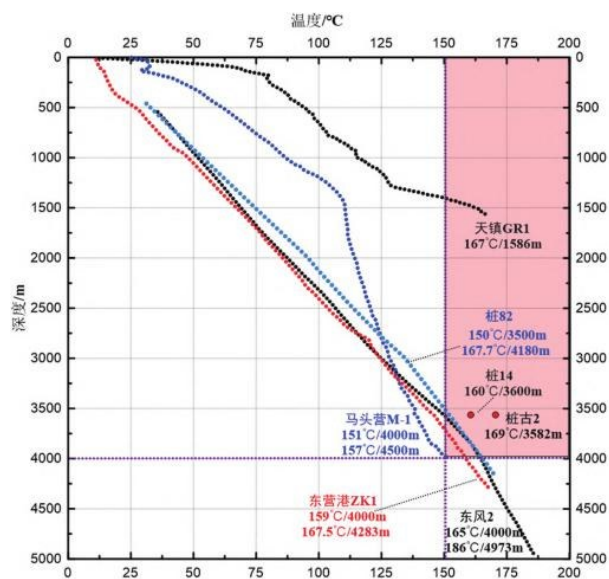


图4 华北中东部典型地热钻孔测温曲线图

$231.15\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。高温流体的水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型,溶解性总固体浓度 $1840\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,偏硅酸浓度高达 $282.9\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氟浓度为 $17.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。放喷试验表明井底含水层压力大、传递快,水动力场稳定,补给条件好、水量丰富。

2.2 河北省马头营潜凸起高温花岗岩干热岩

马头营干热岩区位于河北省唐山市东南方向约90km,构造单元上属于渤海湾盆地黄骅坳陷马头营潜凸起,热储为太古宙变质花岗岩类;盖层为第四系松散沉积物和新近纪泥岩及砂岩,总厚度1350m左右。区域热流最高可达 $90\sim 100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。2019年于深3965m处钻获了温度为 150°C 的干热岩体,初步探查结果显示,在深度4000m处干热岩面积近 80km^2 ,在深度5000m处干热岩面积达 500km^2 (图5)。

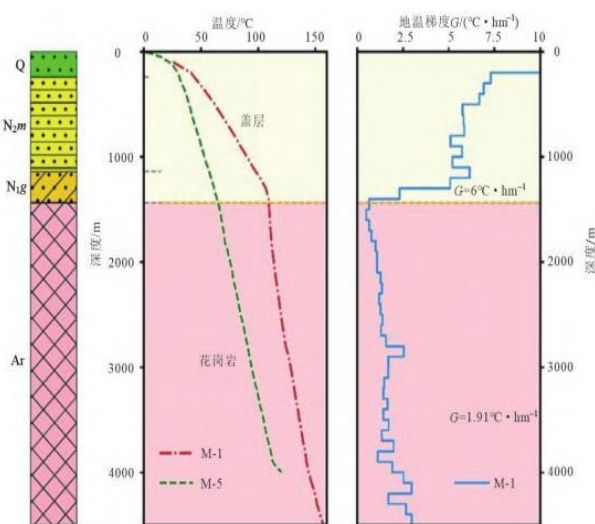


图5 渤海湾盆地黄骅坳陷马头营潜凸起M-1、M-5钻孔测温曲线与地温梯度曲线(据文献修改)

2.3 济阳坳陷桩西潜山高温碳酸盐岩岩溶热储

桩西潜山地处华北盆地济阳坳陷东部,位于东营市河口区仙河镇东北部的滩涂和部分潮间带上,处于济阳坳陷、渤中坳陷和埕宁隆起3大构造单元交汇处,东部紧邻郯庐断裂,属济阳坳陷沾化凹陷东部埕北五号桩孤东近南北向隆起带的中段,南以桩南断层为界与孤北凹陷相邻,北以埕北断层为界与埕岛凸起相接,东西两侧分别是长堤

断层和埕东断层,与埕子口凸起和桩东凹陷相接,面积约154km²。热储层为寒武系奥陶系碳酸盐岩,地层

厚度为100~1998m,顶板埋深大于3500~4500m。2023年在东营港施工的ZK1地热井,奥陶

系灰岩岩溶热储顶板埋深为3580m,于深4283m处钻获167.5℃的高温奥陶系灰岩岩溶热储,中生代—新生代沉积盖层地温梯度为3.73℃·hm⁻¹,热导率为2.3W/(m·K),大地热流值为85.8mW·m⁻²(图6)。

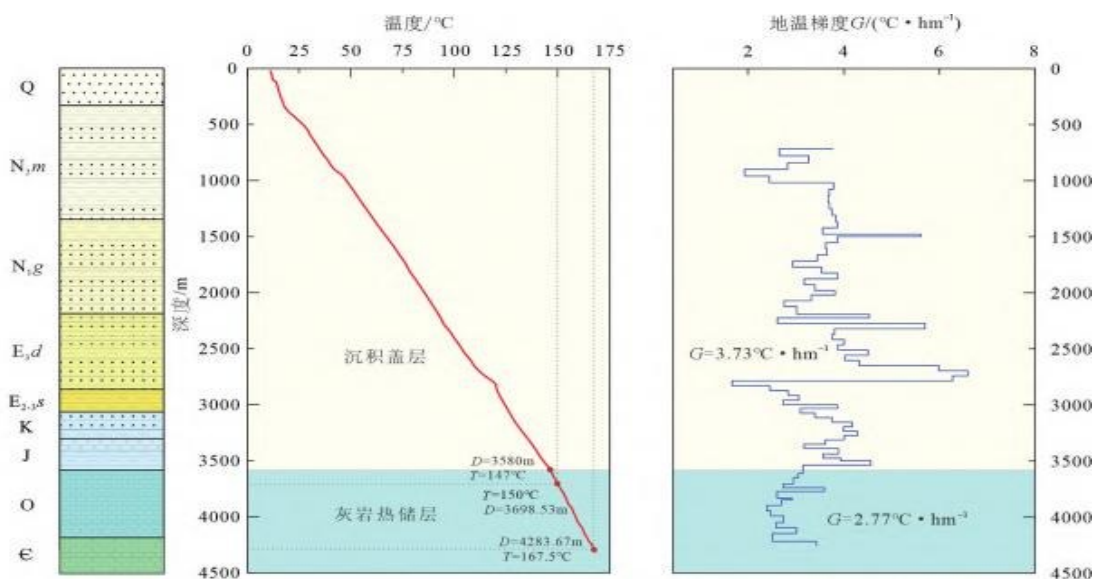


图6 渤海湾盆地济阳凹陷桩西潜山东营港ZK1钻孔测温曲线与地温梯度曲线

3 控热地质要素

3.1 深部地球动力学机制

晚中生代西太平洋板块俯冲造成了华北克拉通破坏,滞留板块的脱碳和脱水作用,加上相关的熔融和交代作用导致东亚大地幔楔内地幔软流圈对流变得更加活跃,是华北板块板内玄武岩成因的主要驱动力。

印欧板块碰撞产生的远场效应和岩石圈地幔的上涌及其相互作用控制了华北地区新构造运动的形成及发展。印度板块由南向北的推挤作用,使华北地块西边界主要受NEE向构造挤压影响,华北东部地区沿郯庐断裂带发生挤压走滑变形。太平洋板块西向俯冲作用对华北地块东移具有制约性,导致燕山构造带挤压构造活动强烈,华北平原构造区差异性运动明显,山西断陷构造带主要表现为张性顺时针扭动运动特征;另外,太平洋板块俯冲引发的深部地幔上涌则主导了华北东部地区的区域热沉降和第四纪5期幔源火山活动。这两个岩石圈

构造作用力在时空上交替和彼此消长,控制了华北地区新构造地貌的差异性演化历史^[41]。

大同盆地位于华北地块内部,是板内构造变形的产物。大同盆地形成演化的区域动力学背景为印度欧亚板块和太平洋欧亚板块碰撞的联合作用,太平洋欧亚板块碰撞主导的地幔岩浆活动在整个新生代持续存在,大同地区在整个新生代处于持续伸展状态,但是10~8Ma之前伸展作用对应的构造应力场未达到使上地壳破裂的强度,其后由于印度欧亚板块碰撞的远程效应,浅部构造应力场达到了使上地壳破裂的强度,大同盆地得以形成演化。该盆地地处蒙古地块、鄂尔多斯地块、太行山隆起和燕山隆起的交汇部位,盆地内深大断裂与邻近的张家口—渤海断裂带为几个地块间的转换构造带,在印度欧亚板块和太平洋欧亚板块碰撞的联合作用下,大同盆地构造动力环境主要呈现开启状态,有利于深部幔源热物质的上侵,使浅部表现出高温地热异常。

3.2 地质构造因素

3.2.1 岩石圈结构

华北克拉通东部岩石圈的减薄机制为:晚中生代西太平洋板块西向俯冲是华北克拉通破坏的一级驱动力,下地壳侧向拆沉作用和地幔隆起、自下而上的地幔热侵蚀作用是二级机制^[58-60]。

华北克拉通破坏使东部陆块的岩石圈厚度减薄至60~80km,地壳厚度减薄至<35km(图1,图7,图8),明显小于厚达200km的西部陆块岩石圈和厚约45km的地壳厚度。其中渤海中部岩石圈厚约60km,地壳厚约25km,是华北东部地壳最薄的地区之一。华北东部岩石圈巨量减薄为深部热能进入地壳浅部提供了构造环境。马头营、桩西地区位于华北克拉通的东部,具备形成高温地热能的高热流背景。

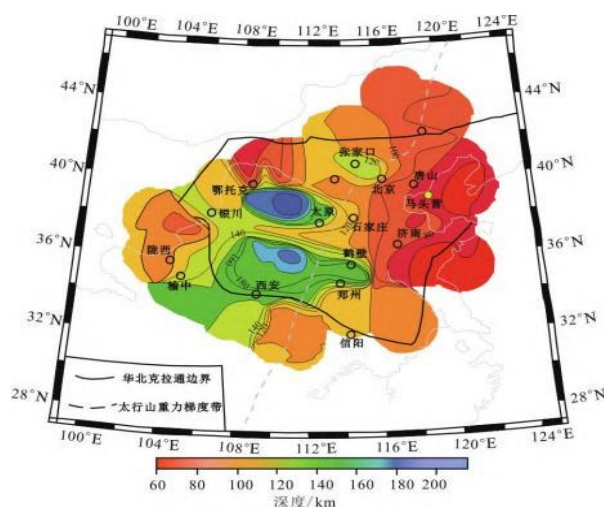


图7 华北地区岩石圈厚度图(据文献修改)

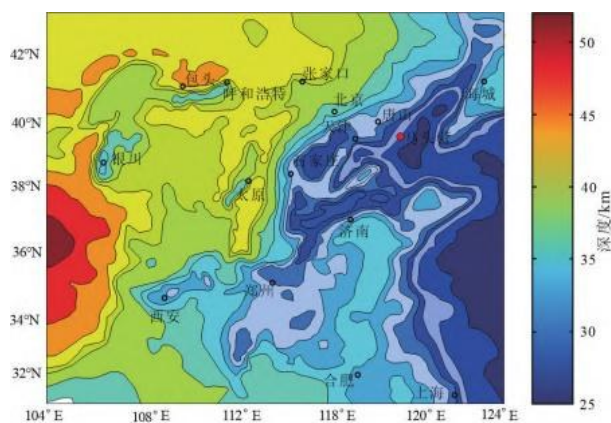


图8 华北地区莫霍面等深线图(据文献修改)

自新生代以来,华北板块东部岩石圈遭遇了大规模破坏,而西部块体鄂尔多斯保留了200km厚岩石圈,基本保留了华北克拉通结构,处于相对稳定状态。山西断陷盆地北部的丰镇一带岩石圈厚度约80km,大同盆地为80~100km,盆地南部恒山一带为100km。大同盆地对应的LAB为向SE倾斜的斜坡,是地幔活动、岩石圈减薄的结果^[57](图1)。

山西断陷的拉张区莫霍面深度为32~37km,而断陷两侧莫霍面抬升了2~3km。接收函数结果显示,大同火山区地壳厚度为40~43km,波速比接近1.85;推测其高波速比与喷发的铁镁质火山岩有关。新生代以来上地幔物质上涌,在地壳底部形成局部的岩浆活动,导致大同火山区呈现厚地壳、高热流、高波速比。

3.2.2 岩石圈热结构

早白垩世晚期和古近纪早期是华北克拉通东部岩石圈破坏高峰期,是岩浆活动、成矿作用最为强烈的时期,热流高($85\sim 88\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$);现今的岩石圈有所增厚,岩浆活动已经大为减弱,但华北克拉通东部仍保持较高热背景(热流为 $60\sim 68\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)。响应岩石圈厚度的变化,盆地岩石圈热结构由三叠纪—侏罗纪时期的“冷幔热壳”型转变为白垩纪至今的“热幔冷壳”型^[64]。

自中生代以来,华北地区软流圈上隆及岩石圈减薄。渤中居里等温面埋深为13~17km,渤海湾、沾化等地居里等温面埋深16~18km,比周边邻区浅5~10km。居里等温面与莫霍面的起伏及地表热流值的高低总趋势基本一致。

大同盆地居里等温面隆起轴呈NE向,最浅20km。其北侧的蒙古地块居里面最深为38km,西侧的鄂尔多斯地块居里面最深处为36km。山西断陷盆地的热流值相对较高,为 $60\sim 80\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$,明显高于鄂尔多斯地块的 $40\sim 50\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。热结构显示,在天镇阳原之下存在一个热的、薄的岩石圈地幔,而其西部则相反;对应华北克拉通岩石圈减薄存在的东西差异;且阳原岩石圈温度场较高,推测其岩石圈地幔正在经历软流圈的上涌与改造作用。

3.2.3 深大断裂及活动特征

马头营干热岩孔位于黄骅坳陷东北部的马头

营凸起,热储为太古宙花岗岩;东营港 ZK1 高温地热井位于济阳拗陷桩西潜山,热储为寒武系奥陶系碳酸盐岩岩溶热储。马头营凸起盖层为新生界;桩西潜山盖层为中生代—新生代沉积岩。马头营凸起和桩西潜山周边区域深大断裂发育,包括郯庐断裂带和张家口—渤海断裂带。

NE—NNE走向的郯庐断裂带是中国东部规模最大的岩石圈断裂带,具多期活动、延展长、倾角陡、切割深和活动强的特点,切穿岩石圈;晚更新世以来其渤海段逆冲右旋走滑,曾发生多次强烈地震。

张家口—渤海断裂带总体走向 NWW,沿断裂带发生过三河平谷 8 级(1679 年)、唐山 7.8 级(1976 年)等大地震,该构造带也被认为是一条新生的活动断裂带,最新活动时代为晚更新世末期—全新世初期。

3.2.4 新构造运动

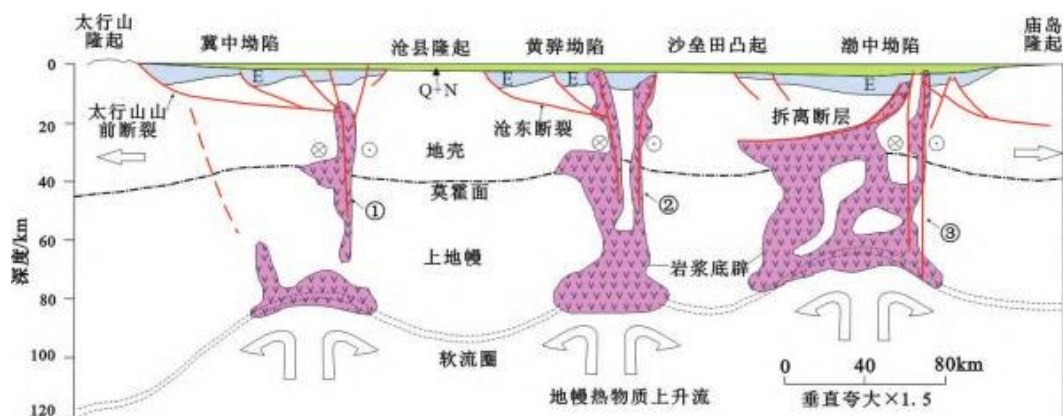
华北东部还存在两个大规模的新生构造带:庙西北—黄河口断裂带和唐山—河间—磁县断裂带。前者位于郯庐断裂带和张家口渤海断裂带的交切部位,是在新构造应力场初始剪切应力作用下形成的地壳剪切破裂带。唐山—河间—磁县活动构造带由磁县—邯郸、新河和唐山断裂等组成,总体走向为 NE 向,近代曾发生邢台 7.2 级(1966 年)等 7 级以上地震,震源破裂以右旋走滑为主,破

裂面倾角陡立。

大同地区在晚中生代以来岩石圈减薄基础上,10~8Ma 以来,软流圈上涌,将地幔热量传递给地壳,造成脆性上地壳出现 NW 向伸展构造应力场,驱动大同裂谷型盆地的形成演化。由于大同地区岩石圈持续减薄,构造应力场持续作用,大同盆地边界断裂持续活动,在更新世处于拉张状态的岩石圈断裂被贯通,源于地幔的岩浆喷出,形成了大同玄武岩火山群。大同盆地发育多条断裂,控制盆地的形成。北边界六棱山山前断裂,在全新世仍然活动。西边界口泉断裂,13.73~1.61ka 期间发生了 4 期断层活动。南侧控盆断裂为恒山北山前断裂,在全新世早期以来曾发生过 3 次古地震事件,最新一次发生于 4.37~2.26ka 之间。

3.2.5 岩浆活动

华北地区中东部受控于太平洋板块向西俯冲,为地壳浅部构造运动提供动力和能量来源,也控制着表层特大地震的发生。区域深大走滑断裂构成了华北地区中东部地幔热物质上涌的主要通道(图 9)。新近纪以来,区域构造和岩浆活动强度减弱,火山岩零星分布在盆地中部的南北两侧;第四纪火山岩仅在海兴县小山和无棣县大山有零星出露,这些年代较新的岩浆活动对现今地温场还有较大影响。



①唐山—河间—磁县走滑断裂带;②黄骅—东明走滑断裂带;③郯庐走滑断裂带。

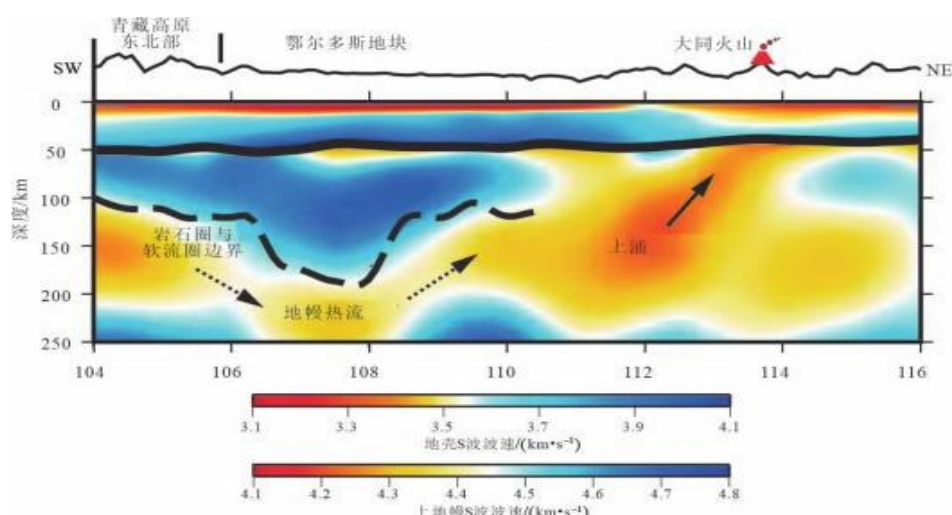
图9 渤海湾盆地大地构造剖面示意图(据文献修改)

岩浆活动对高地温异常控制明显,岩体与围

岩接触带是深部热能聚集的优势通道,该通道与

导水断裂交汇部位构成地热流体富集带。如:沿郯庐断裂带临沂段侵入的沂南铜井闪长岩体,控制了铜井地热田的分布、热储赋存、热流聚集和地热水富集;其中铜1地热井,井深258m时钻遇被铜

井闪长岩体覆盖的寒武系馒头组大理岩和结晶灰岩热储,地热水自流,井口水温92℃,地温梯度高达 $34.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ 。



黑色虚线—岩石圈—软流圈界面 (thelithosphere–asthenosphereboundary (LAB));黑色实线—Moho面;黑色箭头—软流圈物质运移方向。

图10 大同及周边三维剪切波速度结构(据文献修改)

根据面波和背景声联合反演的结果(图10),在鄂尔多斯下方200~250km深度处存在低速异常,该低速异常西面与青藏高原东北缘下方的低速异常相连接,东面与大同火山下方的低速异常相连接,认为鄂尔多斯下方的低速异常为大同火山的岩浆供应提供通道。此外,太平洋板块俯冲西界停滞、垮塌形成的减压熔融,有利于幔源热物质上侵;青藏软流圈物质沿鄂尔多斯地块南、北两个通道向东逃逸,遇到滞留地幔中的大东亚地幔楔,也有助于幔源热物质上侵。马金龙和徐义刚^[74]对大同火山群新生代玄武岩的Sr–Nd同位素进行了测定,显示大同火山群的玄武岩主要来自于软流圈地幔。

3.3 地球物理特征

MT和地震学研究表明,华北地区东部下地壳和软流圈顶部(50~120km)一些地区存在地震波低速区,表现出高电导率异常;软流圈的对流上隆区对应软流圈顶部及其之上的岩石圈低速高导体(层)。

华北克拉通不同地块的岩石圈结构横向变化明显。渤海湾盆地东部岩石圈被强烈破坏减薄,显示出较薄的地壳;中部造山带的南北两端、沿南北重力梯度线的岩石圈也被改造减薄,其中北端大同火山群下方的岩石圈改造减薄最为强烈(图11);而南北两端的低速体通过南北重力梯度

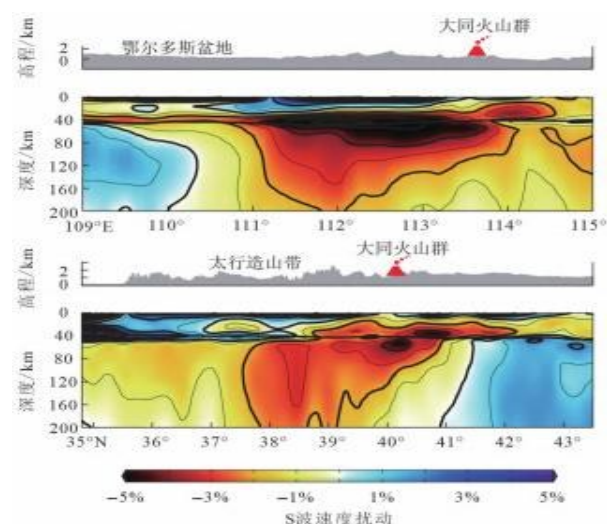
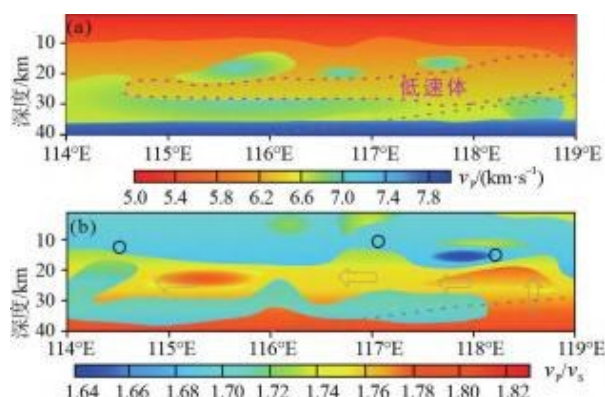


图11 S波速度模型垂直剖面(黑色实线为 Moho面)(据文献修改)

线下方的低速带相连,并延伸至渤海湾盆地地幔深处,代表相同的改造减薄机制,即渤海湾盆地下方地幔上涌的热物质侵入太行造山带下的岩石圈地幔,并流向中部造山带南北两端,造成岩石圈局部改造减薄,地幔热物质的深部来源受控于太平洋板块的西向俯冲;指示大同火山群的岩浆活动可能来源于渤海湾盆地下方的地幔热物质沿西北方向上涌,在鄂尔多斯东北角下方侵入地壳,在地壳内上升过程中受到上地壳阻挡发生东向流动,到达大同火山群下方。由(图12)看出,唐山一带中、下地壳低速高导体呈沿张家口渤海断裂带的中地壳、经北京向张家口流动的趋势,对应天津北京张家口地热资源分布。

张家口渤海地震带电性结构剖面表明(图13),张家口渤海地震带中下地壳深部高导异常体主要沿唐山断裂、张家口断裂等深大断裂深部上侵。反演获取的电阻率模型的电阻率梯度带与断层的空间分布吻合;唐山断裂带中上地壳表现为高阻特



空心圆从左至右:1998年张北6.2级地震;1679年三河8.0级地震;1976年唐山7.0级地震。灰色箭头:低速体流动趋势。

图12 剖面P波速度结构(a)和 v_p/v_s 波速比分布图(b)(据文献修改)

征,在下地壳底部有上涌的深部高导异常体,推测其源于幔源热物质侵入;张家口断裂带中下地壳的深部高导异常区比怀来盆地的规模大,指示张家口断裂带的深部热物质上侵作用更为强烈。

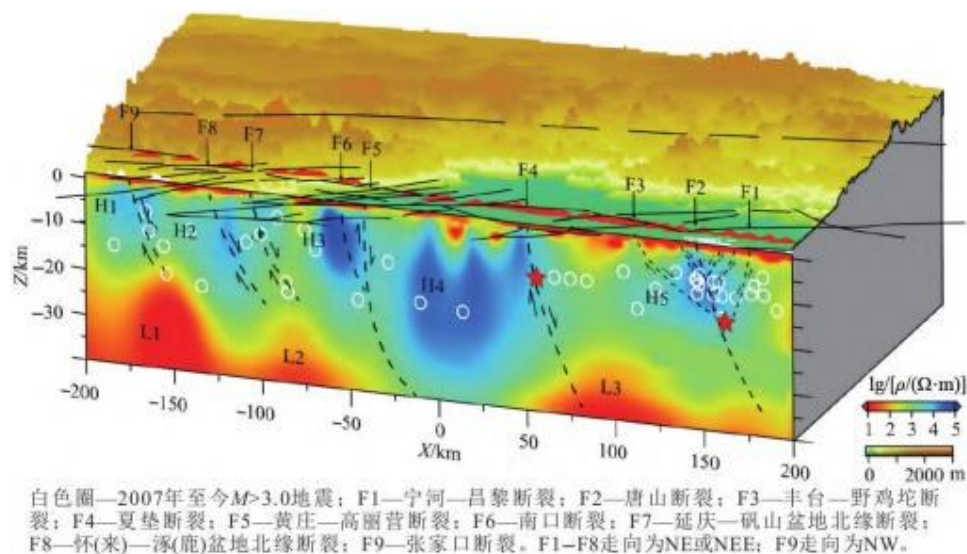


图13 张家口—渤海地震带电性结构解释图(据文献)

3.4 地球化学显示

Sr-Nd二元同位素图解显示碱性玄武岩的同位素特征较为均一,拉斑玄武岩同位素分布范围更大,表明大同玄武岩Sr-Nd整体呈负相关,并落在洋岛玄武岩(OIB)范围内,接近全硅酸盐地球值(BSE)(图14a)。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为-1.5~6.3, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为5.3~

10.6,在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $\varepsilon_{Hf}(t)$ 图解(图14b)上,大同玄武岩样品远离方城玄武岩且沿着地幔演化趋势线呈正相关分布,并且也落在OIB范围内。指示大同玄武岩源于幔源岩浆。

根据张炜斌对大同地热氦氡同位素的计算,天镇—阳高一带地热水幔源氦的贡献率为8%~

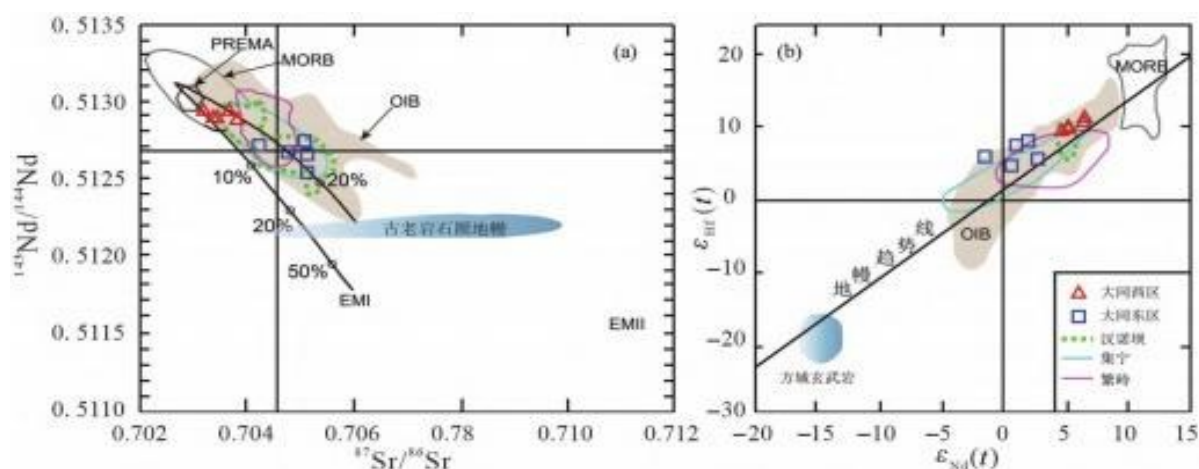


图14 大同玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (a)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (b)图解(据文献)

13.5%,暗示区域存在大量幔源挥发分的逸出,经软弱层和断裂上升聚集至地表。地热水 R_c/R_a 值为0.64~1.10, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 较高(图15),表明高热流与地幔热的贡献有关,可能是软流圈地幔上涌,幔源热物质沿深大断裂上侵所致。新近施工的大同市天镇高温地热孔(DR1)中可溶性二氧化硅含量达 $217.83\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,根据石英温标估算2000m以浅热储的温度为 185.85°C ,远高于华北地区同深度热储的温度,说明确实存在深部异常热源。

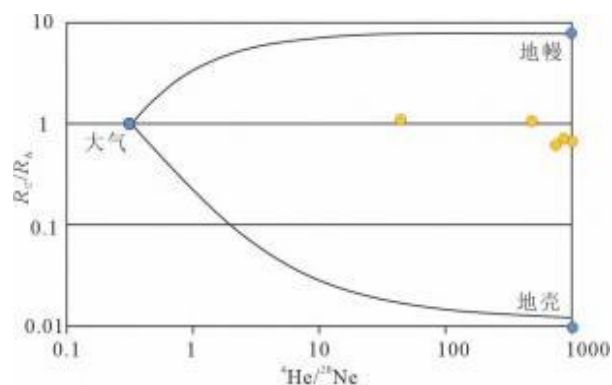


图15 天镇—阳高地区 R_c/R_a - $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图(据文献修改)

4 源、通、储、盖

4.1 热源与流体源

4.1.1 热源

现今“热幔冷壳”型软流圈的对流上隆区决定了地幔热源是华北中东部区域热储的主要热源。定量计算表明,少量深部幔源高温流体注入,就会

产生显著的热效应。切穿地壳乃至岩石圈的深大断裂,可使深部幔源热物质上涌到地壳并向浅部运移。年代较新的幔源岩浆活动和构造运动,也可将深部幔源热物质带到浅部。渤中地区是新生代地幔热物质上侵的中心,渤中地区岩石圈减薄明显;马头营凸起与桩西潜山距渤中凹陷较近,也处于高热流背景区。

来自于东(太平洋板块)、西(青藏高原)两个方向的幔源热物质在太平洋板块俯冲西界汇聚后上侵,在形成大同、汉诺坝新生代玄武岩的同时,也将深部的高温热流快速带到浅部,形成浅部高温热异常。

总之,区域地热资源主要热源来自壳幔传导热、地幔热物质沿深大断裂上侵、壳内放射性元素衰变热和年代较新的幔源岩浆活动及构造运动变形热等,在热源复合构造部位形成浅部地热异常。

4.1.2 流体源

黄骅坳陷的港西、扣村和北堡,济阳坳陷的高青、阳信等地的幔源 CO_2 气藏(图16),指示幔源物质上侵到这些矿区几千米的深度。张家口—渤海断裂带地壳内的低速高导层和大同延怀地区井泉水中的幔源 He 也说明幔源物质沿深大断裂带的上侵。1976年7月28日唐山7.8级地震前,大港油田庄-13井的压力由7月上旬的2.4~2.5MPa,增大到7月下旬的3.7~4.0MPa,指示地震前已经发生了深部热流体的上涌;震时和震后短时间深部流体涌出量达7.5亿 m^3 。

此外,大气降水入渗形成的浅层地下水在重力势能梯度驱动下,沿张性断裂破碎带向深部深循环运移;被深部热源加热后,在静水压力差和冷热水密度梯度双重驱动下沿断裂破碎带对流上涌,也是形成浅部热异常的流体源。

4.2 地球深部流体向浅部运移过程

深大断裂及其活动导致地球深部流体流动、物质交换和新物质产生、能量传递与交换,促使深部流体向地球浅部运移。

杨文采通过地震层析成像资料指出,大陆岩石圈的流体通道网包括深大断裂、碰撞破碎带、重熔深熔作用、拆沉及底侵通道、地幔物质的穿刺构造等。华北克拉通破坏区各块体边界主要由NNW-NW向左旋走滑断层和NNE-NE向右旋走滑断层两组活动断层组成,这两组断层具有共轭关系,指示华北克拉通破坏区地壳为水平挤压和剪切变形环境。块体边界的走滑断层具有断面陡立、平直的特征,并且向下切穿整个地壳,甚至延入岩石圈地幔。

地幔流体及其上升过程中,往往在下地壳下部形成面积较广的韧性流变层(低速层),在适当的环境下可形成熔融岩浆房。岩浆房流体和热流继续向上传递,在中地壳韧性流变层热能再次积聚。中地壳低速流变体连接了上地壳和中下地壳断裂这两个不同的断裂系统,并通过沉积盆地中的断层与各类圈闭联系起来,从而使低速体中的挥发分沿断裂运移至浅部。上地壳断裂也是岩浆上侵的通道,岩浆侵入和喷发的同时与后期都会

释放大量的挥发分。

天镇GR1高温地热孔位于云门山前、阳高天镇地堑带,大地电磁三维反演指示浅部低阻体主要分布在深大断裂附近,在深大断裂交汇处低阻体的范围较大。深部低阻体向上运移通道与深大断裂位置对应,指示深大断裂为深部热源上涌通道。位于上地壳的低阻体深部热源沿阳高天镇地堑带中部的深大断裂向上运移,沿NE向向天镇地区运移,沿近EW向向阳高运移,形成埋深约2km、厚度约1km、以对流为主的浅部高温热储。来自云门山和周边山区补给区的深循环地下水汲取深部热流后形成高温地热水,在重力势能梯度和冷热水密度梯度双重驱动下,沿高渗透性张性导水断裂上涌,形成温泉等地表热响应。

渤海湾盆地NNE-NE向的深大走滑断裂带(图16),如郯庐、唐山—河间—磁县断裂带,以及NNW向的张家口渤海断裂带等都切穿莫霍面乃至岩石圈,成为地幔热物质上涌或基性岩浆上涌的通道。以郯庐断裂带为代表的伸展构造环境中的地壳厚度小,幔源流体上涌作用最强。软流圈高导低速层上隆部位多位于区域深大断裂下部,指示软流圈流体多“选择”深大断裂破碎带作为其上涌通道,同时幔源热物质的上侵也可以促使深大断裂的活化或催生新的断裂,如庙西北—黄河口断裂带的形成与幔源热物质上侵具有一定关系。位于这些深大断裂带附近的马头营花岗岩干热岩体和桩西高温岩溶热储地热田的主要热源均来自幔源。

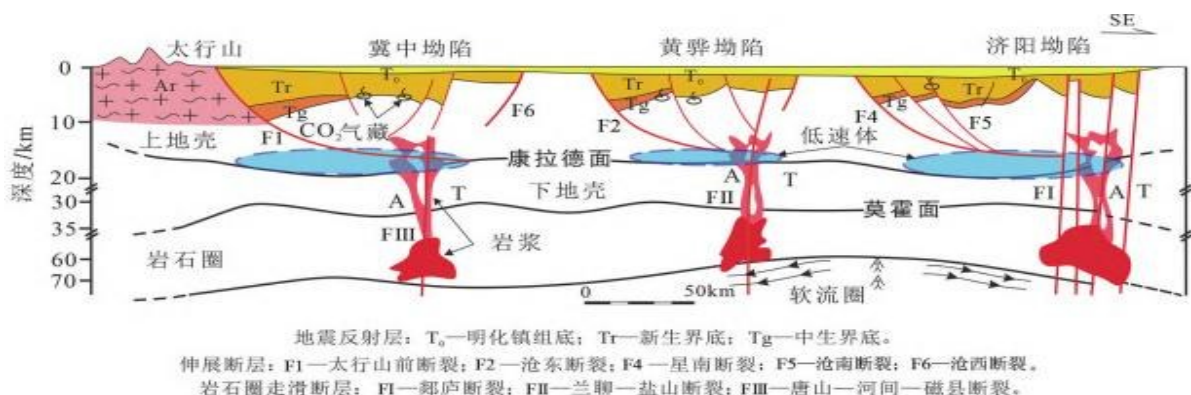


图16 渤海湾盆地坳陷内构造及其岩石圈结构(据文献补充修改)

4.3 深部热量向浅部高温热储的集聚

在岩石圈薄的坳陷基底,软流圈和莫霍面上隆,壳内高导低速层发育并上隆,与居里等温面的起伏形态一致,这是地壳浅部地温热异常的主要控制因素。

马头营凸起距张家口—渤海和唐山—河间—磁县两条深大新生断裂带的交汇部位较近,凸起的南部边界断裂柏各庄断层是张家口—渤海断裂带的组成部分,也是切割岩石圈的新活动断层,其附近新近纪火山岩可能还保留一定的余热。深部热流体和岩浆沿深大断裂的上侵,沿断裂局部形成条带状和串珠状热异常。如深大断裂附近的南堡凹陷南堡3-81井在深5606m的温度为220℃,南堡1-89井在深4700m的温度为192℃,渤中凹陷3-81井在深5508m的温度为190℃,这几口深井的地温梯度达到 $3.30\sim 3.83^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$,明显高于周边地区 $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ 的平均地温梯度。这指示除了正常的深部热传导以外,还有沿深大断裂的深部高温热物质上侵带来的附加热源。

凹凸相间的构造格局控制热流的再分配。马头营凸起四周凹陷沉积了巨厚的新生界,若按 $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ 的地温梯度推算,渤中凹陷、南堡凹陷和秦南凹陷的基底处均可以达到250℃以上的高温,在花岗岩、石灰岩等硬岩高热导率和砂岩泥岩等碎屑岩低热导率梯度驱动下,热流由周边的凹陷区向马头营凸起区聚集。天镇GR1高温孔位于阳高天镇盆地凸起部位,东营港ZK1高温孔位于桩西潜山的高点,具有同样的聚热机理。

4.4 储层与盖层

天镇高温热储为新太古代片麻岩,马头营干热岩体为新太古代变质花岗岩,东营港高温热储为寒武系奥陶系碳酸盐岩,代表中国主要的高温热储类型。

天镇高温地热田盖层为第四系松散沉积物和新近纪陆源碎屑岩,总厚度300m左右。马头营凸起干热岩的盖层为第四系松散沉积物和新近纪泥岩、砂岩,总厚度1350m左右。东营港桩西潜山高温地热田的盖层为第四系松散沉积物和新近纪、古近纪、中生代泥岩砂岩,总厚度3500m以上。

5 典型高温地热成因剖析

5.1 大同盆地天镇高温片麻岩裂隙热储成因机制

牛耀龄提出中国东部新生代基性火山活动成因:与西太平洋板块俯冲带有关的地幔楔吸引作用会引起中国东部软流层东流,该软流层东流引起中国西部高原底部软流层的东向流动补给,这一过程必然会导致东向软流层的减压及减压分熔,从而导致中国东部新生代基性火山活动(图1)。

本文认为,东向软流层的减压及减压分熔、太平洋板块俯冲西界的停滞和垮塌形成的减压熔融,均有助于幔源热物质上侵。幔源热物质在太平洋板块俯冲西界上侵,在形成大同和汉诺坝新生代玄武岩的同时,也将深部的热量传递到地壳浅部。地幔深处热物质在沿大同火山上涌过程中,使上地幔顶部温度增高,发生熔融和脱水,从而在壳幔边界和在地壳内形成熔融或半熔融的低速异常体。热侵蚀作用造成山西断陷带岩石圈破坏和整个华北克拉通“活化”。上地幔物质的上拱导致岩浆喷发溢出,未喷出地表的岩浆沿地壳裂隙向盆地上部运移,在开启性构造应力的作用下形成熔融或半熔融状态的岩浆囊,为该地区地热资源的形成提供稳定的高温热源。岩浆囊沿断裂将热量传递至浅地表,以对流方式传递热量,加热地下水,在地壳浅部形成高温地热流体(图17),沿张性断裂破碎带对流上涌形成温泉。

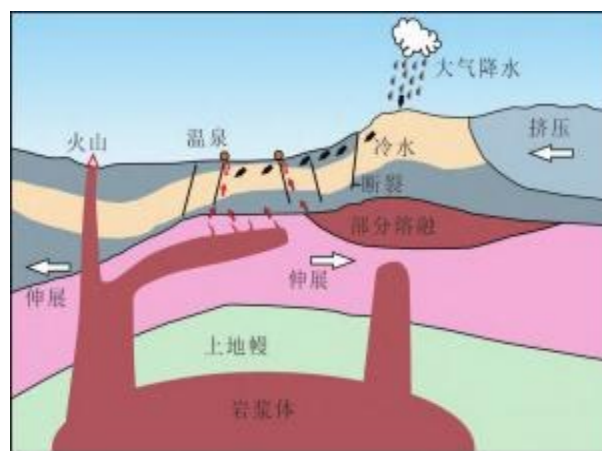


图17 大同天镇高温地热系统热源与水源机制图
(据文献修改)

5.2 河北马头营凸起干热岩成热机制

5.2.1 深部热源机制

受控于华北克拉通破坏,马头营凸起附近渤中凹陷和南堡凹陷一带的岩石圈和地壳厚度为区域最薄。在这种深部构造背景下,软流圈地幔热物质沿郑庐、张家口—渤海、唐山—河间—磁县等深大走滑断裂带为主的岩石圈流体通道上侵,在下地壳下部适当的环境下形成局部熔融岩浆房;在气体和水的参与下于中地壳韧性流变层(高导低速体)形成局部熔融。上地壳断裂连通了中地

壳低速体,将深部热流体和岩浆带至沉积盆地中,形成高温区。

5.2.2 浅部聚热机制

在浅部岩石热导率差异驱动下,热流由凹陷区底部碎屑岩向凸起区硬质岩聚集;同时,深部热流体沿深大断裂上侵,岩浆沿深大断裂新近喷发,沿深大断裂带水热对流,以及渤中和南堡等凹陷深部压实热流体向凸起区的运移聚集等综合作用下,在马头营凸起花岗岩中形成聚热条件良好的高温干热岩体(图18)。

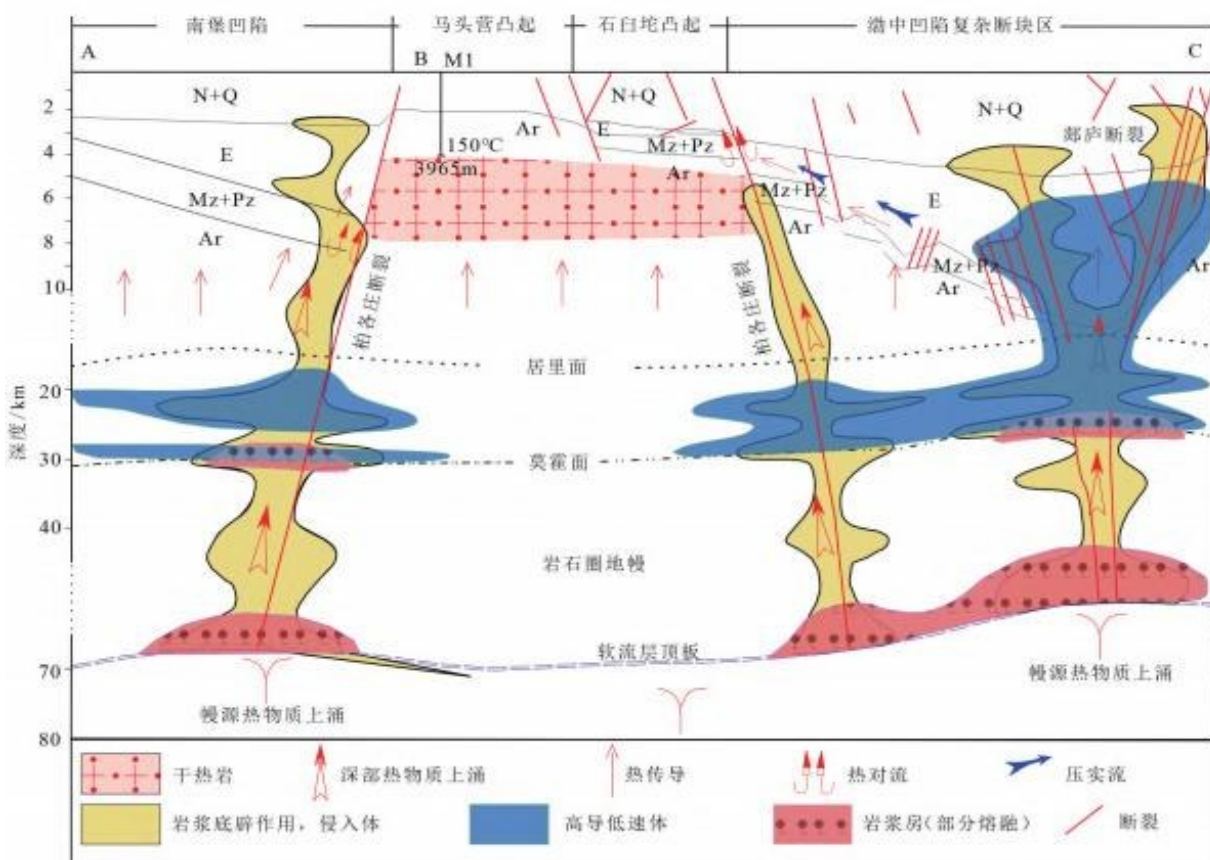


图18 渤海湾盆地黄骅坳陷马头营潜凸起高温花岗岩干热岩成因机制图(据文献修改)

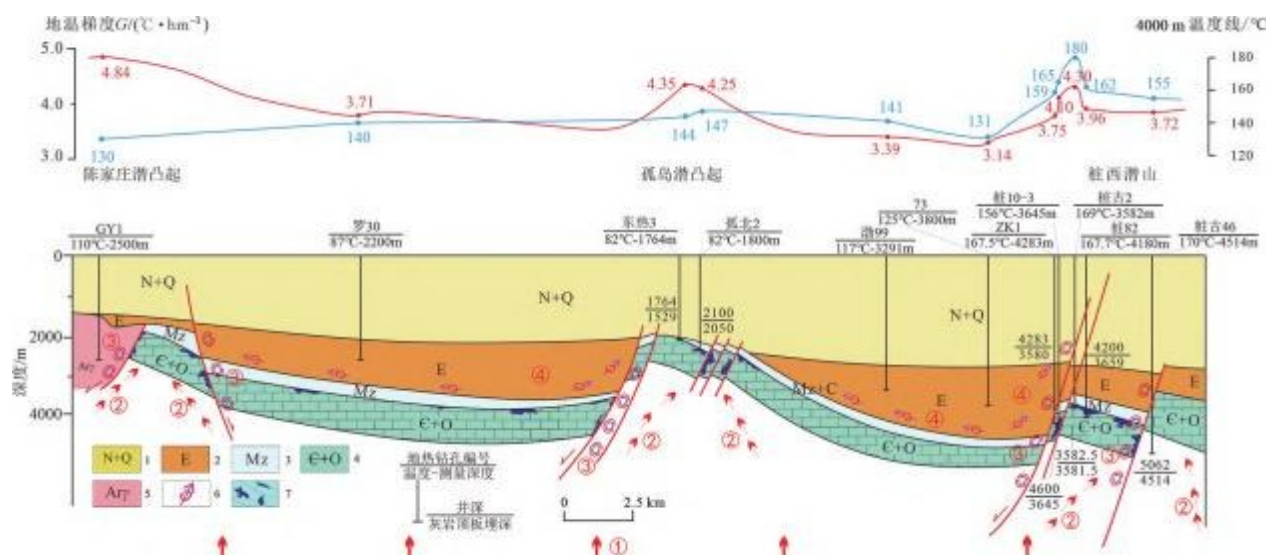
5.3 济阳坳陷桩西潜山高温碳酸盐岩岩溶热储成因机制

桩西潜山具有更有利的源、通、储、盖组合,形成高温、富水岩溶热储。寒武系奥陶系碳酸盐岩岩溶热储顶板埋深3500~4500m,厚度100~1998m,同时具备热能聚集和岩溶发育、地热流体富集条

件,形成渤海湾盆地具地热发电潜力的高温岩溶热储地热田。

5.3.1 聚热机制

从(图19)可以看出,桩西潜山与陈家庄潜凸起、孤岛潜凸起类似,在四元聚热驱动下,具有较其周边凹陷更高的地温梯度。一元是华北克拉通



1. 第四系—新近系;2. 古近系;3. 中生界;4. 寒武系—奥陶系;5. 太古宙花岗岩;6. 成岩压密水流向;7. 岩溶发育带;① 高大地热流传导聚热;②—凸起区高热导率分流聚热;③—深大断裂带对流聚热;④—成岩压密水对流聚热。

图19 渤海湾盆地济阳坳陷桩西潜山岩溶发育机理与聚热机制图

破坏造成的软流圈上涌,导致岩石圈和地壳厚度大幅减薄,驱动高大地热流传导聚热。二元是凸起区硬质岩高热导率分流聚热:在浅部岩石热导率差异驱动形成的“热折射”效应下,热流由热导率低、热阻大的凹陷区砂岩泥岩向热导率高、热阻小的凸起区花岗岩和碳酸盐岩等硬质岩侧向聚集,形成古潜山高温热异常。三元是深大断裂带对流聚热:深循环地下水获取深部热流后形成高温地热水,在重力势能和冷热水密度梯度双重驱

动下,深部高温地热水沿高渗透性张性断裂破碎带上涌,在断裂破碎带及其邻近,发生局部的水热对流,加热沿途的地下水;对流传热和传导传热耦合叠加聚集,在地壳浅部形成明显的高地温聚热异常。四元是凹陷中心的成岩压密水对流聚热:桩西潜山四周凹陷中心沉积地层厚度大,成岩压密水与变质水量丰富,热储流体压力大且温度高,与厚度薄、水量弱、压力小且温度低的边缘地带形成流体压力梯度和温度梯度,驱动地热水沿断裂

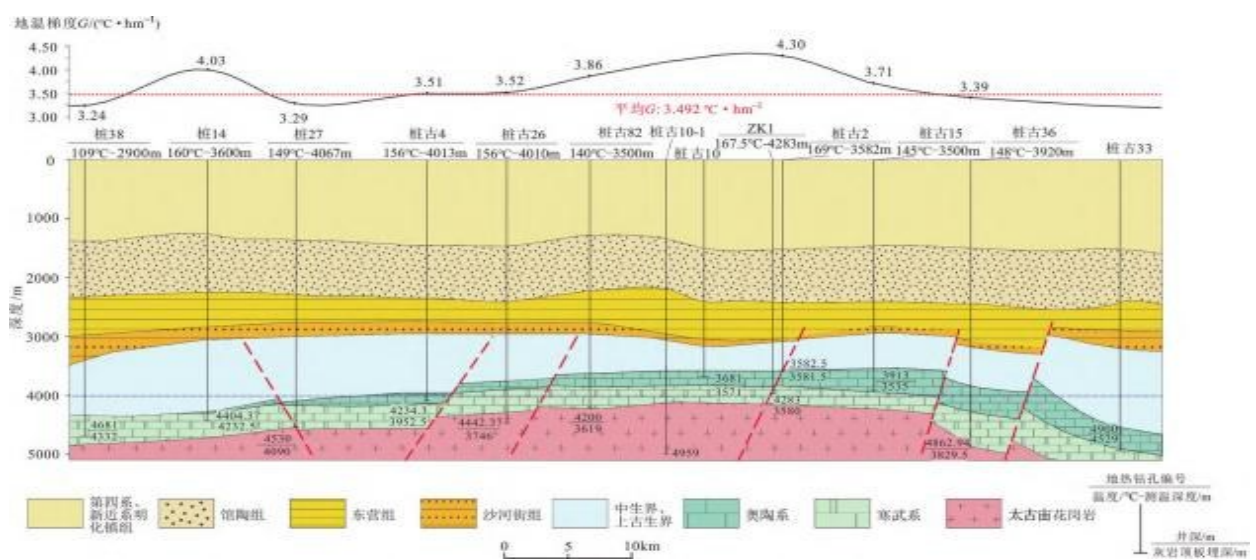


图20 渤海湾盆地济阳坳陷桩西潜山地温梯度剖面图

带和砂岩含水层自凹陷中心向凹陷边缘、呈放射状运移至凸起区高渗透岩溶含水层,呈现“离心流”;向凸起区运移过程中,通过水热对流使得深部地热水体中高温热能上涌聚集于强渗透、高热导的岩溶热储^[33]。

据19眼石油勘探井和ZK1地热勘探井的测温资料,桩西潜山盖层平均地温梯度为 $3.492^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$,超过 $4^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ 的有5眼井;地温梯度最大的为揭穿F5断裂的桩古2井,在深3482m处测得地温为 169°C ,地温梯度达 $4.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ (图19,20),高出济阳拗陷平均值 $1.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$ 。

桩西潜山及周边莫霍面埋深25~30km,由沾化凹陷中部向东北桩西潜山延伸至沂沭断裂带(渤海潍坊段北)逐渐变薄,在渤中凸起最薄,减薄的地壳缩短了深部热源向上传递的路径,增加了幔源传导热为基础的热流背景。软物质上涌、地壳减薄使区域热流背景高,在大切割深度走滑断裂形成的小型破碎带拉分单元内,伸展环境中热物质易沿垂直的走滑断裂形成的薄弱位置上涌,为深部热量传递至浅部提供了良好的通道。地热流体赋存空间是在构造活动影响带(面)与古岩溶发育共同作用下,多期融合、相互影响产生的。多种薄弱面在伸展走滑环境中释放应力,产生新的地热流体赋存空间。南部走滑伸展性质桩南断裂下盘以次生断裂和影响带内裂隙为主,中北部以滑脱面作用下的古岩溶与挤压薄弱面重新拉张产生的断裂为主。地热流体获取深部热流后,沿高渗透率岩体、可溶岩接触带和断裂破碎带向浅部运移,遇巨厚、热导率低的中生代以来砂岩、泥岩地层,热量向上传递受阻,聚集于热储顶部,形成高热流带。

5.3.2 岩溶发育与富水机制

在多期构造活动下,桩西潜山表现为多组NW和NE走向及控制单元边界的近东西向断裂薄弱带,持续伸展的构造环境不仅为深部热物质上涌提供了优势通道,也为优势岩溶通道发育提供了流体运移溶蚀的构造裂隙。

济阳拗陷下古生界碳酸盐岩经历晚加里东—早海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动,遭受了多期次表生岩溶作用和埋藏岩

溶作用,沿不整合面古岩溶风化壳、质纯灰岩或白云岩与泥质灰岩接触面,发育层间岩溶,加之构造层间滑脱运动形成的层间构造裂缝,形成面状层间岩溶热储。在层间岩溶与断裂构造或岩体接触带交汇处,形成复合型强岩溶发育带和地热流体富集带(图19)。据胜利油田勘探钻井资料,桩西潜山多井出现钻具放空现象,流体流量为 $10\sim 112\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;其中,桩古10-1井放空井段深度4042.76~4045.36m,放空顶板距古风化壳465m,放空达2.6m。这些指示3500m以深寒武系奥陶系碳酸盐岩发育有溶孔和溶洞,存在地热流体富集带。

6 结论

(1)晚中生代西太平洋板块向西俯冲不仅造成华北克拉通破坏,滞留太平洋板块的脱碳和脱水作用及相关的熔融和交代作用导致东亚大地幔楔内地幔软流圈对流变得更加活跃,造成华北克拉通东部岩石圈明显减薄,其持续影响也造成新生代华北板块板内玄武岩比较活跃,使华北中东部保持较高的热流背景。

(2)从青藏高原向中国东部的软流层物质流动导致减压和减压分熔,太平洋板块俯冲西界的停滞、垮塌形成减压熔融,幔源热物质在太平洋板块俯冲西界上侵,在形成大同和汉诺坝新生代玄武岩的同时,也将深部的热流快速带到浅部。热侵蚀作用造成山西断陷带岩石圈破坏和整个华北克拉通“活化”。上地幔物质的上拱导致岩浆喷发溢出,未喷出的岩浆沿地壳裂隙向盆地上部运移,在开启性构造应力的作用下形成熔融或半熔融状态的岩浆囊,为该地区地热资源的形成提供稳定的热源。岩浆囊沿断裂将热量传递至浅地表,形成大同市天镇地区高温地热资源。

(3)受华北克拉通破坏影响,马头营凸起和桩西潜山附近岩石圈减薄明显。软流圈地幔热物质沿郯庐、张家口—渤海、唐山—河间—磁县、兰聊—盐山断裂带等深大走滑断裂上侵。在中、下地壳下部适当的构造环境下形成局部熔融高导低速体。上地壳断裂连通了中、下地壳低速体,构成深部热流体与岩浆上涌至沉积盆地中的通道,在

凹陷底部形成高温区。在浅部岩石热导率差异驱动下,热流由凹陷区底部向凸起区聚集,在马头营凸起、桩西潜山硬质岩中分别形成花岗岩干热岩体和高温岩溶热储地热田。

(4)对比天镇、马头营、桩西潜山高温地热的形成条件,天镇地区的岩石圈虽然相对东部较厚,但受东向软流层的减压分熔和太平洋板块俯冲西界的减压熔融驱动,幔源热物质上侵造成新近岩浆上侵或喷发比较明显,壳内熔融或半熔融状态的岩浆囊为高温地热的形成提供了高温热源。马头营凸起与桩西潜山高温地热主控因素使附近岩石圈减薄明显,软流圈地幔热物质沿深大走滑断

裂上侵,热流由凹陷区底部向凸起区聚集,分别形成了高温花岗岩干热岩和高温岩溶热储。桩西潜山碳酸盐岩热储岩溶发育,形成复合型强岩溶发育带和地热流体富集带,具备高温地热发电潜力。

预测汾渭裂谷和张家口—渤海、郯庐、兰聊—盐山、沧东、唐山—河间—磁县等深大断裂带及其次级断裂带分布区,以及渤海湾盆地埋深适宜的潜凸起区,在深度3000~5000m内存在高温地热资源潜力区。

参考文献略

转自《地学前缘》2024 Vol.31 No.6

中深层地热能供热技术在供热项目的应用

袁丽娜,高慧明

北京市煤气热力工程设计院有限公司

摘要:介绍中深层地热能供热技术。结合工程实例,将燃气锅炉供热方案(方案2)作为对比方案,对中深层地热水联合燃气锅炉供热方案(方案1)技术经济性进行分析。方案1、2的项目投资财务内部收益率分别为11.8%、6.3%,方案1的经济性更好。与方案2相比,方案1的年碳排放量降低52.1%,环保性更好。

关键词:地热水供热;中深层地热能;技术经济性;环保性

1 概述

截至2023年末,全国城市集中供热管道长度 52.37×10^4 km,同比增长6.13%;集中供热面积 115.49×10^8 m²,同比增长3.81%。地热能是蕴藏在地壳岩石和地下流体中能够被开发利用的热能资源,具有清洁、可再生、储量巨大、分布广等特点。地热能主要分布于构造活动带和大型沉积盆地中,根据埋藏深度和温度,可划分为3类:开采深度小于200m、温度低于25℃的浅层地热能,开采深度在200~3000m、温度大于40℃的中深层地热能,开采深度大于3000m、温度高于180℃的深层地热能(也称干热岩地热能)。浅层地热能温度较低,

存在取热放热不易平衡等缺点,浅层地热能供热的发展受到制约。深层地热能的利用主要是发电,目前还处于探索阶段。随着勘探技术进步和钻探成本降低,中深层地热能供热具有广阔的应用前景^[1]。

中深层地热能作为一种清洁、可持续的中低品位热能,受到广泛关注,特别在清洁供暖领域,国家在战略和政策层面均给予了大力支持。与浅层地热能相比,中深层地热能具有地温稳定、对地质要求比较宽松等特点,适用于冷热负荷严重失衡的严寒、寒冷地区供暖^[2]。近年来,国家和地方出台了促进新能源、可再生能源供热高质量发展

的文件,对推动中深层地热能应用提出了具体方向和目标。国家发展改革委等部门印发的《“十四五”可再生能源发展规划》提出:锚定碳达峰、碳中和与2035年远景目标,积极扩大可再生能源非电利用规模,积极推进中深层地热能供暖制冷。北京市发展改革委等部门发布的《关于全面推进新能源供热高质量发展的实施意见》指出:坚持新能源供热优先原则,推动供热系统绿色低碳转型替代。稳妥开发中深层地热能,推动中深层水热型地热供热系统建设和中深层井下换热示范项目建设。

本文介绍中深层地热能供热技术。结合工程实例,将燃气锅炉供热方案作为对比方案,对中深层地热水联合燃气锅炉供热方案技术经济性进行分析。

2 中深层地热能供热技术

2.1 地热水供热

地热水供热是通过向中深层岩层钻井,将中深层地热水直接采出,以地热水为热源,由地面系统完成热量提取,用于建筑供热,提取热量后尾水进行回灌。地热水供热可采用直接供热、间接供热、梯级利用联合热泵供热^[3]。地热水梯级利用联合热泵供热流程见图1。地热水从抽水井抽出后经一级换热器放热后温度下降,再进入二级换热器放热后回灌。一部分供热回水经一级换热器提温,为用户供热。另一部分供热回水经热泵机组提温,为用户供热。此外,还可以联合燃气锅炉对热泵机组出水进行补热。热泵蒸发器侧水由二级换热器提温,作为热泵机组低温热源。

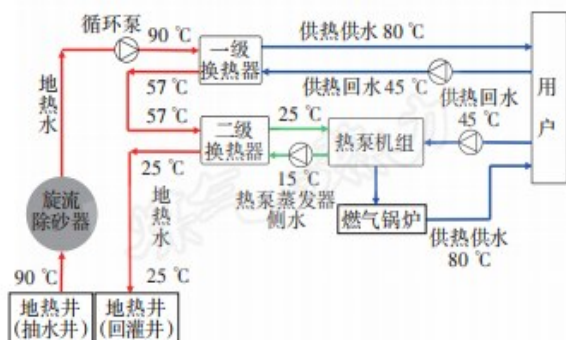


图1 地热水梯级利用联合热泵供热流程

2.2 地埋管地源热泵供热

地埋管地源热泵作为一项中深层地热能开发利用技术,在钻孔中设置套管式地埋管换热器,循环介质在套管内循环流动提取地层热量^[4-5]。

地埋管地源热泵供热流程见图2。套管式地埋管换热器分为外管、内管,循环介质可采用外进内出(外管流进,内管流出)、内进外出(内管流进,外管流出)两种流动方式,图2采用外进内出流动方式。经地埋管换热器提温后的循环介质作为热泵机组的低温热源,供热回水经热泵机组加热后为用户供热。

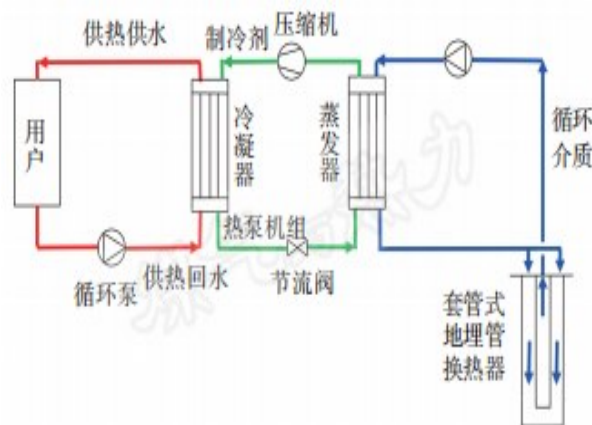


图2 地埋管地源热泵供热流程

2.3 对比分析

地热水供热采用的地热水取水回灌技术相对成熟,施工和维护简单,选址灵活,建设投资和运营成本较低,可方便地进行水质管理和处理,以满足回灌要求。存在以下缺点:需要建设抽水、回灌井群,占用较多空间,地面设备复杂,抽取和回灌地下水会对周围环境造成一定影响。

地埋管地源热泵供热采用的地埋管换热技术直接在钻孔中进行换热,地面设备相对简单,且有利于长期稳定的地下水资源保护。存在以下缺点:地埋管换热器安装和维护难度大,成本较高,对施工队伍要求较高,钻孔等作业可能面临地质不稳定等风险。

3 工程实例

3.1 项目简介

北京某住宅、办公供热项目规划供热面积 $184.14 \times 10^4 \text{m}^2$,其中,住宅建筑供热面积 $138.1 \times 10^4 \text{m}^2$,办公建筑供热面积 $46.04 \times 10^4 \text{m}^2$ 。住宅建筑供暖热指标为 40W/m^2 ,办公建筑供暖热指标为 60W/m^2 ,规划热负荷为 82.86MW 。供暖期为11月15日至次年3月15日。住宅建筑24h连续供热。办公建筑工作时间(周一至周五7:00—18:00)正常供热,其余时间保持低温供热(室内温度保持 10°C)。

项目现有3台 14MW 燃气热水锅炉,无法满足热负荷需求,可考虑新增燃气锅炉。另外,该地区中深层地热水开采温度 90°C ,单井水量 104t/h ,因此也可考虑中深层地热水联合燃气锅炉供热。为方便分析,将中深层地热水联合燃气锅炉供热方案称为方案1,新建燃气锅炉方案称为方案2。

3.2 供热方案

① 方案1

中深层地热水开采温度 90°C ,单井水量 104t/h ,回灌温度 25°C 。方案1工艺流程见图1。抽水井 90°C 出水经一级换热器放热后降温至 57°C ,再进入二级换热器降温至 25°C 回灌。二级换热器二级侧进、出水温度为 15°C 、 25°C 。 45°C 供热回水中的一部分经一级换热器升温至 80°C ,为用户供热。另一部分供热回水先经过热泵机组温度提升至 55°C ,然后由燃气锅炉提升至 80°C ,为用户供热。单台热泵机组额定制热量为 4.5MW ,供暖期平均制热性能系数为5.4。采用1口抽水井配1台热泵机组,设置5采7灌地热井。换热器热效率取98%,则5台一级换热器换热能力为 19.5MW ,与5台热泵机组的总供热能力为 42.0MW ,既有燃气锅炉负责加热热泵机组出水,可满足热负荷需求。供热系统采用量调节方式。

② 方案2

在既有燃气锅炉房的基础上,新增3台 14MW 燃气锅炉,供热系统仍采用量调节方式。

3.3 经济性比较

① 建设投资

比较方案1、2的建设投资,建设投资子项包

括工程费、工程建设其他费、预备费。其中,工程费含建设工程费、设备购置费、安装工程费等。根据京发改〔2023〕1309号《关于全面推进新能源供热高质量发展的实施意见》,对新能源供热装机占比30%~60%的供热项目,新能源部分的建设投资给予20%的补贴。该项目中深层地热水供热装机占比大于50%,因此中深层地热水供热系统(地热井+热泵机组部分)建设投资补贴20%。方案1、2建设投资子项见表1。由表1可知,方案1、2建设投资分别为 $22\,441.0 \times 10^4$ 、 163.9×10^4 元。

表1 方案1、2建设投资子项

方案编号	方案1	方案2
工程费/元	$18\,867.4 \times 10^4$	$10\,150.4 \times 10^4$
工程建设其他费/元	$1\,911.3 \times 10^4$	$1\,112.5 \times 10^4$
预备费/元	$1\,662.3 \times 10^4$	901.0×10^4

② 运行费用

根据项目热负荷延续时间图(2023—2024年供暖期)计算方案1、2年耗电量、年耗气量,分别见表2、3。燃气锅炉单位供热量电耗经测算为 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h/GJ}$,循环泵的全效率为78%。

表2 方案1年耗电量、年耗气量

装置名称	热泵机组	燃气锅炉	循环泵
年尖峰时段耗电量/($\text{kW} \cdot \text{h/a}$)	79.93×10^4	1.72×10^4	11.81×10^4
年峰电时段耗电量/($\text{kW} \cdot \text{h/a}$)	292.79×10^4	5.44×10^4	42.80×10^4
年谷电时段耗电量/($\text{kW} \cdot \text{h/a}$)	406.88×10^4	9.90×10^4	60.75×10^4
年平电时段耗电量/($\text{kW} \cdot \text{h/a}$)	370.91×10^4	8.65×10^4	55.18×10^4
年耗气量/(m^3/a)	—	391.20×10^4	—

表3 方案2年耗电量、年耗气量

装置名称	燃气锅炉	循环泵
年尖峰时段耗电量/(kW·h/a)	7.06×10^4	3.82×10^4
年峰电时段耗电量/(kW·h/a)	25.01×10^4	13.52×10^4
年谷电时段耗电量/(kW·h/a)	37.10×10^4	20.06×10^4
年平电时段耗电量/(kW·h/a)	33.44×10^4	18.08×10^4
年耗气量/(m ³ /a)	$1\,561.70 \times 10^4$	—

天然气价格取2.64元/m³,各时段电价见表4。运行费用除电费、燃气费外,还考虑维护费、人员费用。单位供热面积维护费按运行时间不同取值,见表5。人员费用包含薪酬及福利,按 6×10^4 元/(人·a)计取,方案1配置56人,方案2配置52人。由计算结果可知,方案1、2运行费用分别为 $3\,117.16 \times 10^4$ 、 $5\,014.03 \times 10^4$ 元/a。

表4 各时段电价

电价类别	时段	电价/[元/(kW·h)]
谷电	23:00—次日7:00	0.553 9
平电	7:00—10:00, 13:00—17:00, 22:00—23:00	0.840 8
峰电	10:00—13:00, 17:00—22:00	1.168 7
尖峰	1月、12月;18:00—21:00	1.316 2

表5 单位供热面积维护费

运行时间/a	单位供热面积维护费/(元/m ²)
1~5	0.7
6~10	1.0
11~15	1.5
16~20	2.0

③ 项目投资财务内部收益率

项目投资财务内部收益率(IRR)是衡量投资

项目赢利能力的经济指标,通常情况下,项目投资财务内部收益率越高越好^[6]。方案1、2的系统寿命均取20a。项目投资财务内部收益率除考虑建设投资、运行费用外,还考虑固定资产折旧费。固定资产折旧费按平均年限法计提,系统寿命终了的残值率为0%,折旧年限同系统寿命。项目收益为热费,住宅热价为30元/m²,办公建筑热价为43元/m²。

根据文献[6]提供的计算方法,可计算得到方案1、2的项目投资财务内部收益率分别为11.8%、6.3%。由此可知,方案1的经济性更好。

3.4 环保性比较

环保性分析主要考虑碳排放量。碳排放量计算采用排放因子法。根据DB11/T 1413—2023《民用建筑能耗标准》附录C的主要能源碳排放因子推荐值,电力(非绿色电力)碳排放因子为0.604kg/(kW·h),天然气碳排放因子为2.16 kg/m³。方案1、2年碳排放量见表6。与方案2相比,方案1的年碳排放量降低52.1%,环保性更好。

表6 方案1、2年碳排放量

方案编号	方案1	方案2
年总耗电量/(kW·h/a)	$1\,346.76 \times 10^4$	158.09×10^4
年耗气量/(m ³ /a)	$3\,91.2 \times 10^4$	$1\,561.7 \times 10^4$
年碳排放量/(t/a)	1.66×10^4	3.47×10^4

4 结论

① 方案1、2的项目投资财务内部收益率分别为11.8%、6.3%,方案1的经济性更好。

② 与方案2相比,方案1的年碳排放量降低52.1%,环保性更好。

参考文献略

摘自《煤气与热力》2025年4月刊

跨越三种孔隙度地层的垂直裂隙对有机朗肯循环 地热发电性能影响

高翔¹, 李太禄¹, 张维明², 孟楠¹

1 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300130;

2 中海油能源发展装备技术有限公司工业装备实训基地, 天津 300452

摘要:建立了一种垂直主裂缝跨越3层不同孔隙度的地热储层模型,对增强型地热系统的地热储层进行数值模拟,并将其与有机朗肯循环发电性能进行耦合和分析,计算和分析了注入温度、注入流量、裂隙宽度和裂隙粗糙度4个储层参数对生产井产能和干热岩发电性能影响,最终定量分析了4种特征对生产井温度和单位输出功的不同影响度。结果表明系统在前30年工作周期内,在第5年之前,改变注入温度对增强型地热系统的影响较小。在不考虑储层中换热流体渗漏的情况下,注入井流量越大,生产井温度越低;注入井温度越高,生产井温度越高。对于地面发电系统,注入温度对发电性能影响最显著,注入流量对地面发电系统影响较小,即地热储层结构对发电系统的输出功、炯效率及炯损失有决定性的影响。

关键词:增强型地热系统;垂直裂隙;有机朗肯循环系统;数值模拟;炯分析

引言

全球变暖将对人类生活产生巨大影响,在能源应用方面,用于发电的常规化石燃料燃烧伴排放大量的温室气体,将进一步加剧温室效应。为了减缓全球变暖,利用可再生能源发电是减少温室气体排放的有效措施。据统计,地热资源作为可再生能源,能够开采的地热潜在在3km以下的深度超过118EJ/y,在10km的深度超过1109EJ/y。根据地下岩石特征,地热系统可分为热液系统和增强型地热系统。对于热液系统,地下储层的主要特征是高渗透性,并存在地下渗流。而增强型地热系统可以提取干热岩石中的热量,并通过有机朗肯循环转化为电能。其中干热岩为低渗透性脆性岩石,且在此深度下几乎没有地下水。与水热型系统相比,增强型地热系统可以在地热储层中通过水力压裂诱导产生人工裂缝而提取更多的热量进行发电。对于增强型地热系统,工程建设

的主要过程如下:1)地热资源勘探;2)干热岩和天然裂缝的分布勘测;3)注入井钻探;4)通过水力压裂技术生成裂缝储层;5)构造由注入井,生产井和储量组成的地下循环系统;6)建设地上有机朗肯循环发电系统。其中储层模型的研究是增强地热系统的关键问题。

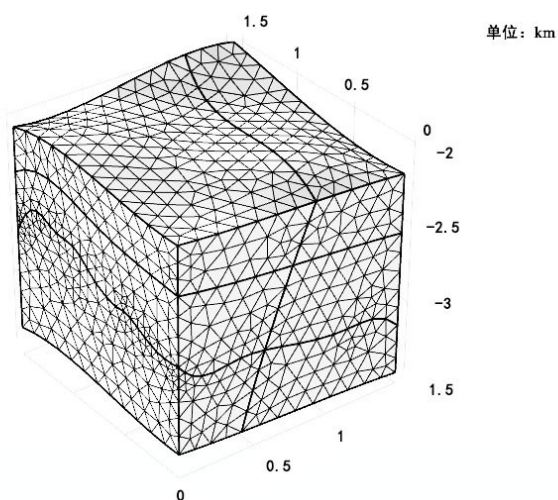
目前,增强地热系统的成本仍然很高。在过去的五年中,地热发电量平均每年增加500MW,而这种增长大部分来自新兴经济体,因为它们拥有丰富且尚未开发的资源。根据IEA统计,到2030年,如果可持续发展情景中的发电量达到282TW/h,则地热发电量每年需要增加10%的发电量。因此,应通过技术或政策来开发增强型地热系统以降低成本。当前成熟的模型有单孔隙度模型,双孔隙度模型和多孔隙度模型,其中单一孔隙模型将储层描述为单一孔隙介质,该模型首先将储热区假设为单孔隙区,然后将单孔隙区划

分为3个不同区域进行数值模拟。因此,在模拟和分析中忽略了裂缝的复杂结构,单一孔隙度模型不能准确地描述储层裂缝的复杂构造。双孔隙模型将裂缝储层视为多孔介质,由2个不同的多孔区域组成:裂隙网络视为理想的高孔隙度区域,而干热岩则视为低孔隙度区域。尽管双孔隙度模型的应用已经成功地描述了地热储层,但储层存在非均质性,该模型仍然存在问题。基于孔隙介质理论,多孔隙度模型基于原生裂缝、次生裂缝、断层和微裂缝,形成分层渗透结构或渗流通道,再对储层传热等过程进行数值模拟。目前,多孔隙度模型仍处于开发阶段。对于储层中的裂隙结构,基于传统弹性力学发展的PKN模型、KGD模型和P3D模型通常只能描述单个裂隙中的流动与裂隙热弹性问题。对于多裂隙结构,当前离散随机网络模型能够对复杂的地下裂隙网络进行描述,但该种模型大多应用于地下流动过程,缺乏成熟的传热模型对传热-流动过程进行描述。而上述所有的模型通常只对地热储层进行数值模拟,缺少对发电系统与地热储层之间的耦合关系进行研究,而地热储层作为热源对发电性能有关键作用,因此本文对增强型地热系统的裂缝储层模型进行数值模拟。对储层主要特征参数包括注入井温度、注入井流量、裂隙宽度和裂隙粗糙度进行研究。通过建立多孔介质模型对物理模型描述,本文分析了以上4种参数对生产井出口温度的影响,最终得出4种参数与出口温度的定量关系,并对模拟数值结果与增强型地热系统中的有机朗肯循环进行耦合,对有机朗肯循环的单位输出功进行了分析。

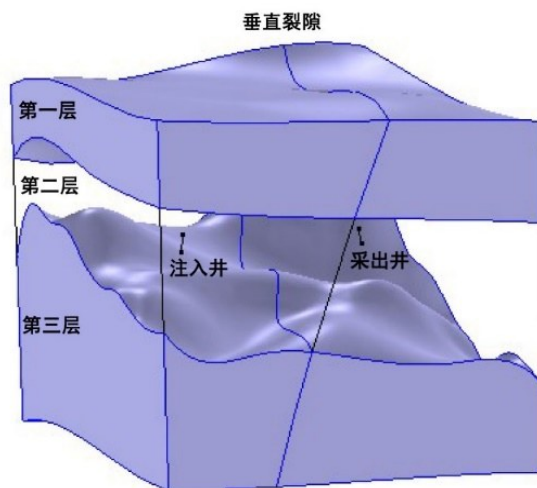
1 地热储层及有机朗肯循环(ORC)发电模型描述

本文的所构建的物理模型如图1所示。图1所示的系统为双井式增强型地热系统。储层的模拟区域为 $1500\text{m} \times 1500\text{m} \times 1500\text{m}$,模拟区域下表面距地表 3500m ,其中注入井与生产井位于同一水平面上,深度为 2500m 。为了减小数值模拟所需的计算资源,将注入井与生产井简化为长 20m 的线热源与线热汇,忽略了实际过程中两井的井筒与周围储层的对流换热过程^[9]。

对于储层,假设同一储层内为均匀介质,自上而下分为3种不同弹性力学性质的储层,其孔隙度分别为 0.02 、 0.02 、 0.01 ,即人工裂隙大多分布在生产井与注入井所在的水平面上。在储层中存在一条主裂隙,其孔隙度为 0.6 。在储层的顶部平面与底部平面均假设没有流体流动,不考虑压降损失及裂隙渗漏效应。基于以上假设,本文采用了多孔介质传热模型对传热过程描述,并基于达西定律对流动过程进行了描述,通过COMSOL的耦合求解器对这一问题进行数值模拟。模型示意图及网格如图1a)和图1b)所示。



a) 模型网格划分图



b) 模型结构示意图

图1 热储模型结构及网格划分示意图

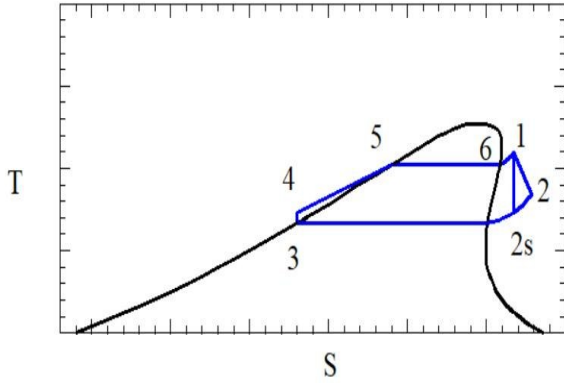


图2 有机朗肯循环T-S图

多孔介质中流体流动的连续性方程为

$$\frac{\partial(\rho_f f \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = -Q_f, \quad (1)$$

式中: ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; ϕ 为储层的孔隙度; t 是时间, s ; u 是达西渗流速度, m/s ; ∇ 是矢量微分算子; Q_f 为流体在裂隙与干热岩的流动过程中的质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

由于流动过程服从达西定理^[13,13-18], u 的表达式为

$$u = -\frac{k}{\mu_f} (\nabla p + \rho_f g \nabla z), \quad (2)$$

式中: k 是储层的渗透率, m^2 , 其中 $k = d_f^2 / (12 f_f)$, f_f 为裂隙粗糙度; u 是流体的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为压力, Pa ; $\rho_f g \nabla z$ 代表重力影响下的压力梯度, z 代表垂直方向的分量。

多孔介质内能量方程为

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) = -Q_{f,E}, \quad (3)$$

式中: T 为多孔介质温度, K ; $c_{p,f}$ 为流体的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $(\rho c_p)_{\text{eff}}$ 是有效容积; λ_{eff} 是有效导热系数; $Q_{f,E}$ 为裂隙与干热岩之间的传热量。

式(3)中 $(\rho c_p)_{\text{eff}}$ 和 λ_{eff} 可表示为:

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1-\phi) \rho_s c_{p,s} + \phi \rho_f c_{p,f}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1-\phi) \lambda_s + \phi \lambda_f, \quad (5)$$

式中 ρ_s 为储层中干热岩密度 (kg/m^3), $c_{p,f}$ 为干热岩比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), λ_s 为干热岩导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

同样地, 裂隙的能量方程为

$$d_f (\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + d_f \rho_f c_{p,f} u_T \cdot \nabla_T T - \nabla_T \cdot (d_f \lambda_{\text{eff}} \nabla T) = d_f Q_{f,E}, \quad (6)$$

式中 d_f 为裂隙宽度 (m)。

对于地面发电系统, 本文建立了增强型地热系统中有机朗肯循环发电系统的模型, 所计算的初始参数分别为: 环境压力为 101.3 kPa , 汽轮机效率为 0.75 , 冷却水进口温度为 308.15 K , 出口温度为 318.15 K , 冷凝器侧水泵扬程为 20 m , 水泵效率为 0.9 , 有机工质采用 R245fa , 本系统的有机朗肯循环发电过程 T - s 图如图2所示。其中相关参数的计算模型如下所示:

$$w_t = m_{\text{wf}} (h_1 - h_2), \quad (8)$$

$$w_p = m_{\text{wf}} (h_s - h_4), \quad (8)$$

$$w_{\text{hp}} = m_{\text{gw}} g H_1 / \eta_{\text{hp}}, \quad (9)$$

$$w_{\text{cp}} = m_{\text{cw}} g H_2 / \eta_{\text{cp}}, \quad (10)$$

$$w_{\text{net}} = 0.95 \times w_t - w_{\text{cp}} - w_{\text{hp}}, \quad (11)$$

$$s_e = m_{\text{wf}} (s_1 - s_2) + m_{\text{gw}} (s_{\text{out}} - s_{\text{in}}), \quad (12)$$

$$s_e = m_{\text{wf}} (s_2 - s_1), \quad (13)$$

$$s_c = m_{\text{cw}} (s_{\text{out}} - s_{\text{in}}) + m_{\text{wf}} (s_4 - s_2), \quad (14)$$

$$s_p = m_{\text{wf}} (s_5 - s_4), \quad (15)$$

$$s = s_e + s_t + s_c + s_p, \quad (16)$$

$$E_{\text{ground}} = m_{\text{gw}} [h_{\text{in}} - h_{\text{out}} - t_0 (s_{\text{in}} - s_{\text{out}})], \quad (17)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{w_{\text{net}}}{E_{\text{ground}}} \times 100\%, \quad (18)$$

式中: t_0 为环境温度; h_1 、 h_2 分别为汽轮机进出口焓值; h_4 、 h_5 分别为工质泵进出口焓值; s_1 、 s_2 分别为汽轮机进出口熵值; s_4 、 s_5 分别为工质泵进出口熵值; h_{in} 、 h_{out} 分别为地热流体生产井、注入井焓值; s_{in} 、 s_{out} 分别为地热流体生产井、注入井熵值; w_t 为汽轮机输出功; w_p 为工质泵耗功; w_{hp} 、 w_{cp} 分别为蒸发器与冷凝器侧冷却水耗功; η_{hp} 、 η_{cp} 分别为蒸发器与冷凝器的换热效率; H_1 、 H_2 分别对应两个泵的扬程; s_e 、 s_t 、 s_c 、 s_p 分别为图2对应1-5、1-2、2-4、4-5四个过程的熵产; s 为总不可逆损失与总熵产; m_{wf} 、 m_{cw} 、 m_{gw} 分别为工质质量流量、冷却水质量流量、地热流体质量流量; E_{fe} 、 E_t 和 E_c 分别为1-4、4-5、5-6过程的热量焓; E_{ground} 为地热流体焓损失; η_{ex} 为焓

效率。

因此,在满足达西渗流条件下,裂隙宽度与输出功之间关系可由式(19)表示

$$d_f(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + d_f \rho_f c_{p,f} u_T \cdot \nabla_T T - \nabla_T \cdot (d_f \lambda_{\text{eff}} \nabla T) = d_f m_{\text{wf}} \eta (h_6 - h_5), \quad (19)$$

式中: η 为效率系数; d_f 为裂隙宽度。若发电系统为ORC系统,则 η 为发电系统热源侧换热器换热效率。因此,由等式右侧 h_6 和 h_5 参数能够根据热力循环推导得出 h_1 与 h_2 ,由式(19)建立了发电功率与地热储层之间的耦合关系。

对上述公式在MATLAB和COMSOL实现,水和R245fa的热力学参数来自REFPROP软件,计算流程如图3所示,有机朗肯循环-地热储层结构如图4所示。

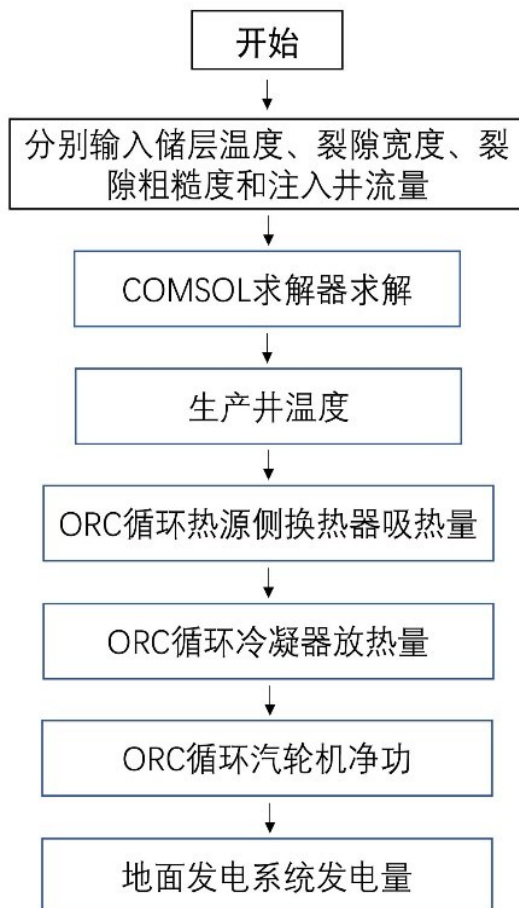


图3 计算过程流程图

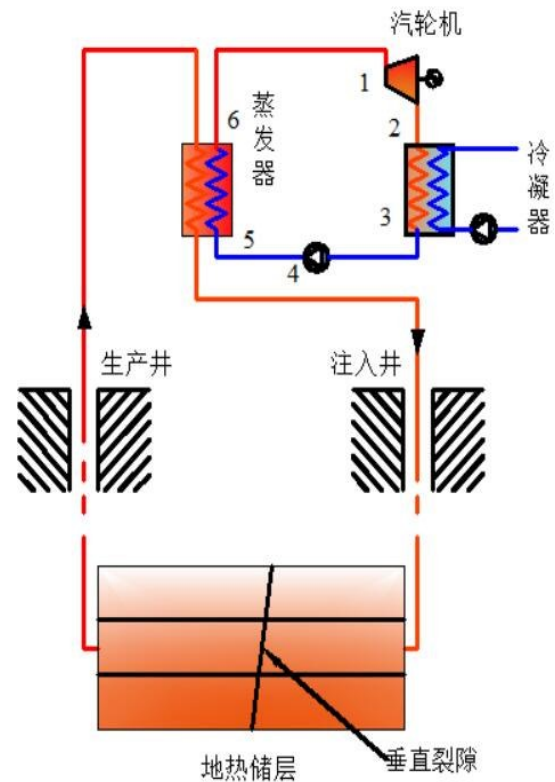


图4 有机朗肯循环-地热储层示意图

2 初始条件与边界条件

本文通过从模拟区域顶部边界面线性增加温度与压力来初始化储层,并忽略了换热流体在地热储层中的损失。相关的模拟参数来自于美国沙漠峰深层地热井^[19-20],地热梯度和注入井与生产井压力差分别为0.08K/m和5MPa。对于温度边界条件,模拟区域顶部平面与底部平面设置为绝热边界条件,且温度与初始储层温度相同^[21-23]。对于流动边界条件,假设模拟区域外没有流体流动,因此在所有模拟区域边界面上设置无流体流动边界条件。对于初始条件,根据文献^[20]中的实验数据,算例1模拟了在1.2m³/s注入井流量时,注入井进口温度为313.15K、333.15K、353.15K和373.15K时生产井的出水温度;算例2模拟了注入井333.15K时,注入井流量1.0 m³/s、1.2 m³/s、1.4 m³/s和1.6 m³/s时生产井的出水温度;算例3模拟了333.15 K注入井温度,1.2 m³/s注入流量下时,主裂隙宽度分别为0.05 mm、0.1 mm、0.5 mm、1.5 mm和2 mm时生产井温度;算例4模拟了333.15 K注入井温度,注入

井流量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 裂隙内粗糙度分别为 0.8、1.6 和 2.4 时的生产井温度。

本文所进行的数值模拟的其他初始条件详细信息如表 1 所示。

表 1 所有算例相同的其他初始条件

储层中井长度	20 m
注入井角度	10°
井模拟区域的半径	1 m
流量	1244.8 L/s
顶部温度	283 K
地热梯度	0.08 K/m
注入井与生产井压差	5 MPa

3 地热储层模拟结果分析

3.1 注入井温度对生产井温度的影响

本文选取了 313.15K、333.15K、353.15K 和 373.15K 下 4 种注入温度时对储层进行模拟。模拟了 30 年内储层温度场的变化情况。如图 5 所示, 在增强型地热系统工作的前 5 年内, 4 种注入温度对生产井的温度影响较小, 所得的四种生产井温度接近, 因此在工作的前 5 年内, 改变注入温度对增强型地热系统的影响较小, 可采用相对较低的注入温度来保持系统的发电性能。在第 5 年时, 此算例下生产井温度为 425K 左右, 在第 15 年时, 4 种条件下的生产井温度产生了较大变化, 当注入井温度为 373.15K 时, 其注入井温度比 313.15K 的生产井温度高 31K, 但此时注入井温度 373.15K 比 313.15K 高 60K, 因此, 以增强型地热系统的生命周期为例, 当系统运行时间超过 15 年时, 此时提高注入井温度并不能显著提高发电效率。第 5 年时, 所有生产井温度均开始趋于平稳, 主要原因为初始 5 年运行时间以内, 注入井与地热储层之间温差较高, 换热量较大, 得到的生产井温度较高; 而伴随取热过程进行, 储层温度逐渐降低, 注入井温度保持恒定, 二者温差减小, 导致换热量减少, 生产井温度逐渐降低。

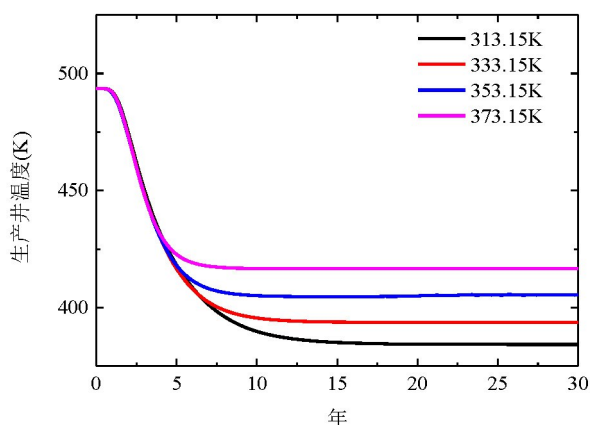


图 5 313.15 K、333.15 K、353.15 K 和 373.15 K 下 4 种注入温度时生产井温度曲线

另外, 当运行时间超过 15 年后, 各生产井温度趋于稳定, 在算例的初始条件及边界条件下, 每 20 K 注入井温差, 将会在 15 年以后导致 10 K 左右的生产井温差。而在 15 年以前的运行阶段, 不同情况下的生产温度之间的温差是非线性关系, 存在注入温度越高, 所获取的生产井温度越高的规律, 这也与储层流动与传热的连续性方程和能量方程的非线性耦合关系相对应。

3.2 注入井流量对生产井温度的影响

此算例选取了注入井流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 4 种情况下, 模拟了 30 年运行周期中生产井温度的变化情况, 如图 6 所示。

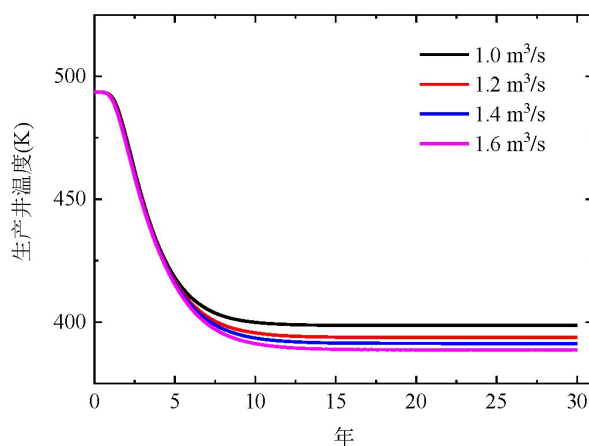


图 6 注入井流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时生产井温度曲线

不同注入井流量同样在前5年时的各自生产井温度近似相等,当运行时间达到10年才出现明显差别,且各自的差异近似线性。由于本文基于流体在储层中无损耗的理想性假设下,在控制方程中,流量与总换热量是线性关系。但在实际地热储层中,由于流体存在渗漏现象,注入井流量与生产井流量通常不相等。另外,渗漏过程与储热地层中的微裂隙有较大相关性,因此实际地热储层中的注入井流量与生产井温度之间的相关性,应通过实际储热地层结构数据进行分析。同样对15年后不同注入井流量下的生产井温度进行比较,发现 $1.6\text{m}^3/\text{s}$ 注入井流量与 $1\text{m}^3/\text{s}$ 注入井流量相比,其生产井温度降低了 10K 左右,因此,增加注入井流量将降低地热储层的平均温度,生产井温度逐渐降低。虽然增加注入井流量将提高产热量,但从工程角度分析,增大流量需要增加注入井与生产井之间的压差,在此算例中,两井压差已设置为 5MPa ,而在文献^[21]中提到在当前技术条件下,达到此种压差耗费巨大,因此,增加流量所带来的发电收益较小。

3.3 不同裂隙宽度对生产井温度的影响

本文选取的主裂隙宽度分别为 0.05mm 、 0.1mm 和 0.5mm 。并分别对生产井温度的影响进行了模拟,模拟结果如图7所示。

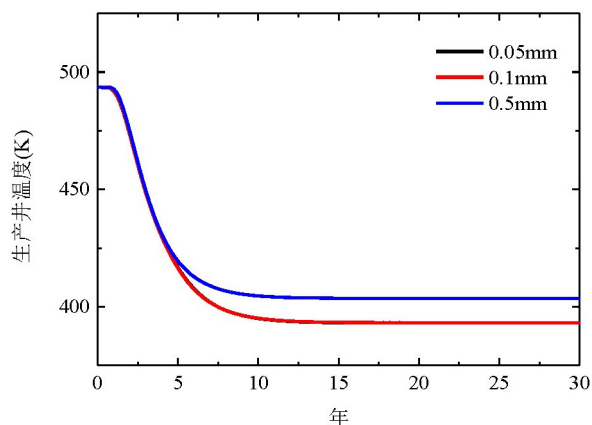


图7 主裂隙宽度分别为 0.05mm 、 0.1mm 和 0.5mm 时生产井温度曲线

由于本文中的主裂隙为一条垂直裂隙,并且跨越了3种地层,因此裂隙宽度越大,其换热量越

大,由图7可得从第5年开始, 0.5mm 裂隙宽度的生产井温度一直高于裂隙宽度较小的 0.1mm 裂隙和 0.005mm 裂隙,这主要因为本文所研究的主裂隙类型为垂直裂隙,此裂隙连通了3个地层。因此当运行时间增大时,且裂隙宽度较低时,经垂直裂隙传递的来自各个地层的热量远远小于裂隙宽度较大时所传递的热量,小裂隙宽度只使大部分传热过程集中在两井所在的水平面处,而大裂隙宽度却能够连通不同地层,传递其他地层的热量,显著提高了生产井温度。

3.4 裂隙粗糙度对生产井温度的影响

本文模拟了 303.15K 注入井温度、 $1.2\text{m}^3/\text{s}$ 注入井流量时,裂隙内粗糙度分别为 0.8 、 1.6 和 2.4 时生产井温度,模拟结果如图8所示。

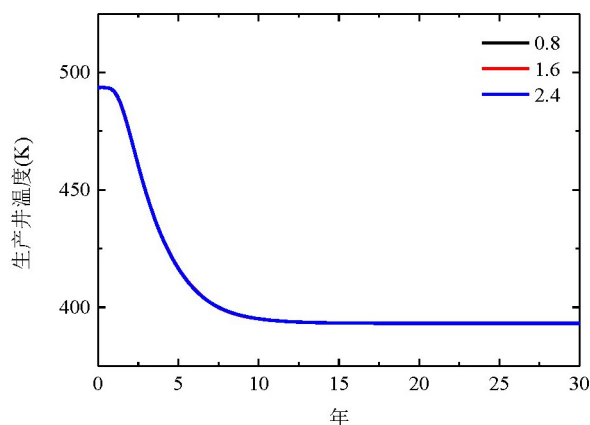


图8 不同粗糙度下生产井温度曲线

如图8所示,不同裂隙粗糙度对生产井温度影响较小,而此算例下选取的裂隙宽度为 0.05mm ,当裂隙宽度越小时,裂隙粗糙度对流体流动影响越大。但图中所示的差距却很小,因此在实际工程中,裂隙粗糙度对生产井温度的影响可以忽略。另外,流体在裂隙中的流动过程复杂,并非层流,属于雷诺数较大的紊流,在流动过程中存在数量较多的涡流,干扰了流动边界层,削弱了裂隙粗糙度对流体流动与对流换热过程的影响。综上所述,对于地热储层,增大粗糙度对发电增产效果不显著,而裂隙宽度是主要影响生产井温度的因素。在水力压裂过程中,构建合理的裂隙结构能够有效提高生产井温度,从而提高发电功率。

4 增强型地热系统地上发电系统性能分析

地热储层结构在运行过程中无法再次通过水力压裂技术重新生成裂隙,因此本文只对实际过程中易于控制且对发电效率影响较大的注入温度和注入流量进行分析,结果如图9和图10所示。

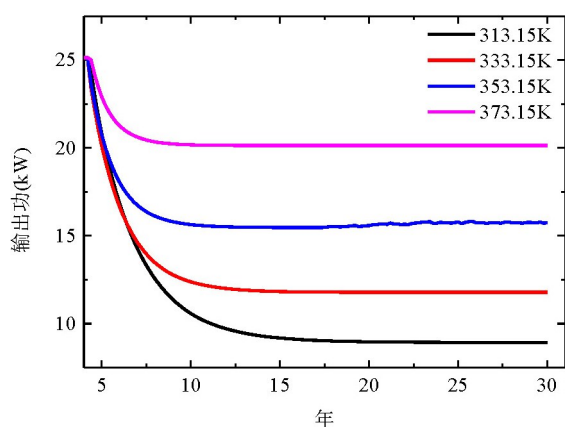


图9 不同注入井温度条件下有机朗肯循环单位输出功曲线

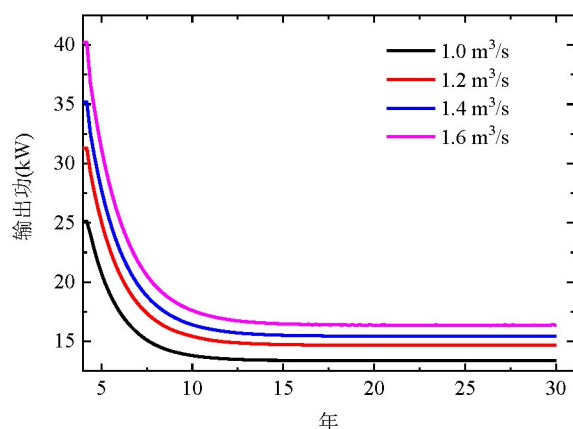


图10 不同注入井流量下有机朗肯循环单位输出功曲线

由图9可得,汽轮机单位输出功的变化趋势与生产井趋势相同。由于有机朗肯循环模型设定了汽轮机入口处压强上限,因此在图9中,从第4年开始绘制输出功曲线。以第10年最小的单位输出功为例,图9的单位输出功由19kW左右衰减到10kW,衰减幅度较大。为了保持较高的单位输出功,自第10年开始应提高注入井温度保持输出功。再通过图9与图10的对比,当运行10年以后,输出功趋于稳定时,注入井流量 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的输出功比

$1.6\text{m}^3/\text{s}$ 仅高1400kW,因此改变注入井流量进行增产与改变温度相比效果较差。由于实际过程中地热储层存在渗漏现象,因此提高注入井温度比提高注入井流量更易实现。另一方面,提高注入井流量相当于提高了注入井与生产井之间的压差,而当前模拟条件下所设置的5MPa压差已较大,因此,从成本与安全角度考虑,在此压差基础上继续提高注入井流量的存在技术限制。而本文又忽略了地热流体渗漏的情况,同时在其他文献研究中发现渗漏率跟储层结构相关^[22],因此,对运行10年以后的增强型地热系统进行增产,首选方式为提高注入温度。

影响有机朗肯循环发电系统的一个重要指数为炯效率,因此下文将结合有机朗肯循环发电系统与地热储层进行炯分析。

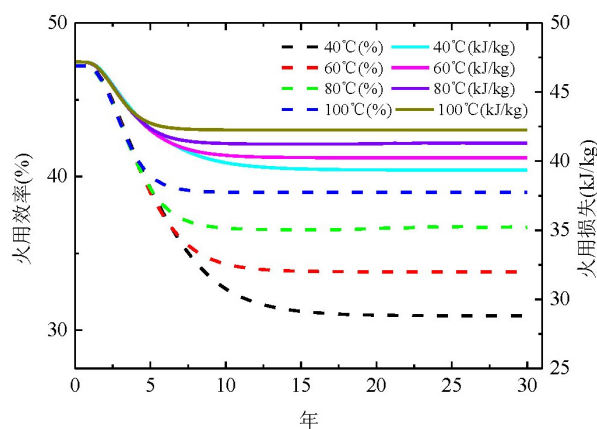


图11 不同注入井温度下炯效率与炯损失变化曲线

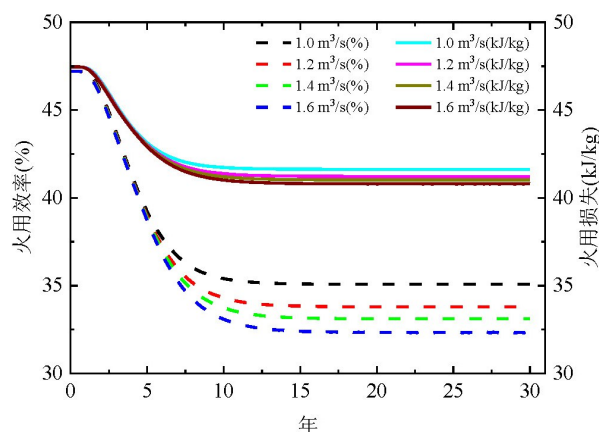


图12 不同注入井流量下炯效率与炯损失变化曲线

图 11 为注入井温度分别为 313.15 K、333.15 K、353.15 K 和 373.15 K 时,地面有机朗肯循环发电系统的炯效率及炯损失变化曲线。由图 11 可知,当注入温度从 313.15 K 增长到 373.15 K 时,其炯效率增加了 10%,而炯损失只升高了 3 kJ/kg 左右。因此,改变注入温度对系统炯效率的影响较大,提高注入温度能显著增加地热储层的可用能。由图 12 可知,改变注入井流量对炯效率及炯损失影响较小,流量越小,炯效率及炯损失越高,因此,较小流量能够提高系统炯效率,但同时也减小了换热流体携带的热量。在影响干热岩与水之间传热量的 3 种因素(换热时间、达西渗流速度、换热流体流量)之中,通过对图 9 和图 10 进行比较,发现存在流体流量越小,输出功、炯效率和炯损失均增大的规律,因此,在干热岩与水换热过程中,较小流量虽然直接降低了一部分换热量,但在小流量、低达西渗流速度的条件下,越小的流量使干热岩与水换热更加充分,即相对于增大流量,干热岩与水之间的换热过程对系统的输出功、炯效率及炯损失的影响更显著。

5 结论

本文对增强型地热系统的裂缝储层模型进行数值模拟。对注入井温度,注入井流量,裂隙宽度和裂隙粗糙度 4 种参数对生产井温度的影响进行

分析。通过建立多孔介质模型对物理模型描述,得出 4 种参数与出口温度的定量关系。并通过数值模拟对增强型地热系统中的有机朗肯循环进行耦合并对单位输出功进行分析。主要结论如下:

1)在增强型地热系统前 30 年工作周期内,在第 5 年之前,改变注入温度对增强型地热系统的影响较小,可采用相对较低的注入温度来保持系统的发电性能。

2)在不考虑储层中换热流体渗漏的情况下,注入井流量越大,运行时间第 15 年以后储层温度趋于稳定时,生产井温度越低;当注入井温度越高,运行时间第 15 年以后储层温度趋于稳定时,生产井温度越高。

3)对于垂直主裂隙,其粗糙度对生产井温度影响较小,其宽度在 4 种影响因素中对生产井影响最显著。

4)在影响有机朗肯循环系统输出功的因素中,干热岩与换热流体的传热过程对输出功、炯效率及炯损失影响最显著,换热流体流量对输出功、炯效率及炯损失影响最小,即地热储层结构对发电系统的输出功、炯效率及炯损失有决定性的影响。

参考文献略

转自《河北工业大学学报》2022, Vol. 51 No.2

地热发电潜力几何? 技术经济评估与国别潜力解析

史田宇 撰文

王 遥 编辑

摘要

因为之前没有对全球增强型地热的能源潜力做详细分析,这项研究要算出全球增强型地热能发多少电,以及它对各国能源供应有啥影响。研究首次详细分析了全球哪些土地适合建增强型地热电站,还对比三种储层模型来弄清楚不同方法的差别。结果发现适合建电站的土地比例因各地情况差很多(全球平均 25%),只有 Gringarten 模型

能让电站经济可行发电;低成本地热集中在 17 个国家等地方,对发展中国家是便宜可靠的电但得靠发达国家降钻探成本,美国、日本、中国这些国家只能靠地热补一部分能源。

全文解读

应对气候危机的能源转型浪潮中,地热因“不看天吃饭”的稳定供电能力,被视作基荷能源的希

望之星。但增强型地热系统(EGS,即“干热岩”技术,无需天然热水层)的全球真实潜力究竟有多大?成本能否亲民?运营策略如何最优?一项突破性研究首次系统性拆解这些谜题,为地热规模化应用绘制“技术边界”与“经济蓝图”,其发现或将改写全球能源布局的预期。

过去数十年,学界对EGS的技术潜力多依赖“体积法”——通过储层热焓、热衰减率、回收率等参数估算发电量。但这类研究存在三大致命缺陷:区域差异失控(欧洲、美国不同研究结果相差4-4.7倍)、土地适用性“隐身”(从未像风电光伏那样精细分析“哪些地能建电站”)、技术与经济“两张皮”(产能模型和成本模型各自独立,看不到产能如何影响度电成本)。更关键的是,EGS的“可持续运营策略”(比如储层热衰减后能否自然恢复)对潜力的影响,始终缺乏统一结论。

这项研究直击痛点,完成三项“全球首次”突破:

团队分析地下水分布、地形坡度、自然保护区、居民区、原始森林、水体等6大要素,量化各国“能建EGS电站的土地占比”。结果颠覆直觉:全球平均仅25%土地适合开发EGS,且国家间差异悬殊——有的国家可用地不足5%,有的则高达72%。比如,自然保护区密布的区域,或地下水易受污染的地带,都会被排除。这意味着,过去“拍脑袋”的区域潜力估算,极可能因忽略土地约束而严重失真。

研究对比三类主流储层模型(Gringarten模型、传统体积法、“可持续运营”模型),并与全球64座现役EGS电站数据交叉验证。结果发现:只有Gringarten模型能模拟出“经济可行的产能”——当产能调至100kg/s时,储层热衰减控制在10-30K,度电成本才有望下探至“亲民区间”;而传统假设“30年运营、热衰减10K”的模型,算出的成本高达30欧分/度(约合人民币2元),完全不具备经济性。过去研究中,技术潜力(能发多少电)和度电成本(LCOE)是“平行世界”。本次研究首次把两者绑定:产能越高,热衰减越快,成本也随之波动。这种联动分析,让“EGS在何时何地能盈利”的答案清晰浮现——比如,若按Gringarten模型优化运营,部分地区成本可压至5欧分/度内。

研究还抛出一个震撼结论:以人类时间尺度衡量,EGS并非“可再生能源”。因为储层热衰减后,靠自然热流恢复需要超2万年——远超过人类合理的能源利用周期。这意味着,EGS的“可持续性”需靠技术手段(如更高效的热回收、储层管理)而非自然再生,产业需重新审视其资源属性。

成本地图的绘制,让EGS的“经济势力范围”一目了然:

5欧分/度内(约0.35元人民币):2050年,冰岛、美国、中国、日本、匈牙利、俄罗斯等17国可实现这一目标,这些地区地质条件优、钻井成本可控。

10欧分/度内:美洲、非洲、东南亚大片区域被覆盖,地热或成这些地区“低价基荷电”的选项。

但需注意:EGS当前成本仍高于风电、光伏——后者度电成本已下探至2-3欧分。不过,地热的“王牌”是调度性:风电光伏靠天吃饭,地热却能“想发就发”,在电网调峰、保障供电稳定性上无可替代。

对学界而言,它填补了三大空白:全球土地适用性的精细量化、技术-经济模型的深度绑定、运营策略对潜力的影响机制。对产业和政策制定者,它划清了“能做什么”与“该怎么做”:

- 发展中国家若想借力地热,需依赖发达国家突破钻井成本(当前钻井占EGS成本超60%);

- 美、中、日等能源大国,地热只能“部分补位”能源结构,无法独挑大梁;

- 产业需聚焦Gringarten模型优化运营、降低热衰减影响,而非迷信“自然可再生”。

这篇研究用数据破除“地热潜力无限”的浪漫想象,代之以技术约束与经济边界的清晰画像。在“能源转型既要清洁又要稳定”的当下,这种“祛魅式”的科学分析,恰是产业少走弯路、政策精准发力的关键——这也是它值得被关注的核心价值。

引文

Franzmann et al. Global geothermal electricity potentials: A technical, economic, and thermal renewability assessment[J]. RENEWABLE ENERGY, 2025, 250.

西安石油大学—西咸能源地热工程及储能技术应用基地 揭牌成立中国可再生能源学会地热专业委员会

西安石油大学党委副书记、校长王进富,党委副书记张木,副校长张荣军;西咸集团党委书记、董事长张涛,党委委员、董事、副总经理郑涛;西咸能源领导班子成员、部分专家学者及相关方负责人参加揭牌仪式。

仪式上,全体参会人员听取了西安石油大学在新能源领域的特色科研技术汇报和西咸集团、西咸能源总体发展情况介绍。随后,张涛为西安石油大学碳中和未来技术研究院常务副院长赵金省颁发基地常务副主任聘书,张荣军和彭小峰在参会嘉宾共同见证下签署基地合作协议,张涛与王进富共同为基地揭牌。

作为区域能源技术创新的重要载体,基地将聚焦地热资源梯度开发、多元储能系统优化及智慧能源综合利用等方向,逐步构建涵盖基础研究、技术攻关与成果孵化的全链条创新体系,加快建

立更多以企业为主导的创新联合体,积极组建“科学家+工程师”团队,着力建设跨区域综合能源服务体系,打造多能互补、低碳高效的示范项目集群和具有行业示范效应的地热能开发与储能技术矩阵。目前,基地首批科研项目《西咸新区地质参数与地热资源综合评价》《西咸新区水热井回灌技术研究》已正式启动。

基地的成立,是西咸能源坚持创新驱动,深入践行校企合作的又一重要成果,更是联合西安石油大学深化产学研融合、推动能源技术创新的重要里程碑。

下一步,西咸能源将深入践行产学研一体化发展,持续整合多方资源,深化人才培养机制,全力推动地热能技术创新和行业进步,助力区域地热与储能产业蓬勃发展。

中国石化部署实施地热井超1800口

中国石化 报

地热资源绿色低碳、分布广泛,是全球能源转型的重要选项。随着地热资源规模化开发需求越发迫切,资源富集机理与分布规律认识不清、经济高效勘探开发技术欠缺等问题,严重制约地热产业高质量快速发展。据了解,2013年以来,中国石化在华北地区累计部署实施地热井超1800口,助力实现我国中深层地热资源规模化开采。

2013年以来,中国石化发挥上中下游一体化优势,组建创新团队开展研究,在中国东部地热资源富集机理与勘探开发关键技术等方面取得显著理论与技术创新,开发了以规模化供暖为主的中深层地热直接利用技术路线,引领我国地热产业发展。

中国石化创新团队持续开展地热地质理论研

究,创新构建多热源耦合理论框架,建立砂岩“多期砂体连片叠加”、碳酸盐岩“相带岩溶共控成储”和花岗岩“风化断裂复合控储”三类热储发育模式,提出“中-新生界沉积盖层是地热富集必要条件”的新认识,为地热勘探开发提供科学依据。构建中深层地热资源探测评价技术体系,创建基于多尺度地质建模和数值模拟技术的地热资源评价方法,打造城市地热“重-磁-电-震-化”多元技术组合,落实中国东部中深层地热资源潜力。

近年来,中国石化累计建成地热供暖“无烟城”24座,中深层地热供暖面积达1.2亿平方米;部署实施的我国首口5200米深地热科学探井,成为全国乃至全球中深层地热研究和开发利用标杆。

中企在全球首次执行的一次闪蒸地热电站 EPC 项目 顺利取得完工证书

中国可再生能源学会地热能专委会



当地时间7月16日,中国电建所属山东电建三公司以EPC总承包方式承建的印尼卢穆特巴莱二期地热电站项目正式收到由业主签发的完工证书(Completion Certificate)。该证书的签发标志着项目顺利完成工程建设阶段,全面转入运行性能测试与指标验证阶段。

该项目为中国企业在全球首次执行的一次闪蒸地热电站EPC项目,位于印尼南苏门答腊省巨港市穆印县,装机容量55MW。自开工建设以来,项目团队高质量完成设计、采购、施工、调试等全链条任务,实现机组安全稳定运行,并在此前已按期实现SLO、COD及15天可靠性运行等重

要节点目标。

印尼卢穆特巴莱二期地热电站项目不仅是印尼政府为实现“2034年新增5.2GW地热发电装机、可再生能源装机比例达到新增电力装机规模76%”目标的重要工程,更是中印能源合作的重要示范工程,具有显著战略意义。该项目的建成为缓解当地电力供应压力、推动绿色能源转型、促进地区经济社会发展提供了坚实保障,也为印尼实现可持续发展战略目标贡献了“中国智慧”与“中国力量”。

信息来源:大众网

