



碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展

王贵玲^{1,2}, 陆 川^{1,2}

中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;
自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061

摘 要: 碳中和、碳达峰需要能源供给领域的重大系统变革, 地热能作为一种清洁低碳、稳定连续的非碳基能源, 可为实现这一目标提供重要保障。本文简要介绍了中国地热资源赋存条件, 就直接利用和地热发电分别综述了浅层-中深层地温能和水热型地热资源的开发利用技术和发展; 重点介绍了地热制冷、重力热管、地热-太阳能联合发电等广受关注的新技术、新方向; 展望了发展前景和研究开发方向, 为相关的工程技术和研究人员提供参考。

关键词: 浅层地温能; 中深层地热; 水热型地热; 重力热管; 地热-太阳能联合发电; 碳中和

PROGRESS OF GEOTHERMAL RESOURCES EXPLOITATION AND UTILIZATION TECHNOLOGY DRIVEN BY CARBON NEUTRALIZATION TARGET

WANG Gui-ling^{1,2}, LU Chuan^{1,2}

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;

2. Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: The goal of carbon neutrality and carbon peak requires major system changes in energy supply. As a clean low-carbon and stable non-carbon-based energy, geothermal energy can provide guarantee for the realization. The paper briefly introduces the occurrence conditions of geothermal resources in China, and summarizes the exploitation and utilization technology and development of shallow-middle deep geothermal energy and hydro-geothermal resources respectively in terms of direct utilization and geothermal power generation, focusing on the widely concerned new technology and direction such as geothermal refrigeration, gravity heat pipe and geothermal-solar power combined power generation and looking forward to the development and research direction to provide reference for related engineers and researchers.

Key words: shallow geothermal energy; middle-deep geothermal; hydro-geothermal; gravity heat pipe; geothermal-solar combined power generation; carbon neutrality

0 引言

2020 年 9 月, 中国在联合国大会上表示: “中国将

采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取在 2060 年前实现碳中和。”

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家重点研发项目“深部碳酸盐岩热储层天然构造及人工干预下综合评价技术”(2019YFB150410302).

作者简介: 王贵玲(1964—), 男, 研究员, 从事地热资源勘探开发技术研究工作, 通信地址 河北省石家庄市新华区中华北大街 268 号, E-mail//guilingw@163.com

通信作者: 陆川(1972—), 男, 研究员, 从事地热资源开发利用技术研究工作, 通信地址 河北省石家庄市新华区中华北大街 268 号, E-mail//luchuan@163.com

为实现此目标,亟需建设清洁、低碳、高效、多元的现代能源体系^[1]。根据联合国《世界能源评估》报告在2004年和2007年给出的可再生能源发电的对比数字,地热发电的利用系数在72%~76%之间,明显高于太阳能(14%)、风能(21%)和生物质能(52%)等可再生能源。地热能用来发电供应的时间全年可达6 000 h以上,有些地热电站甚至高达8 000 h,用来提供冷、热负荷也非常稳定。地热资源以其运行稳定、可持续利用和环保等优势具有广阔的应用前景^[1-3]。

我国地热资源储量丰富,约占全球地热资源的1/6,以中低温为主^[4-8]。浅层地热能资源遍布全国,年可开采资源量折合 7×10^8 t标准煤。浅层(200 m深度内)地温梯度总体分布为北高南低,南方平均值为 $2.45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,北方大部分地区地温梯度由西向东逐渐升高,平均值为 $3.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ^[4]。中深层地热资源主要集中在大型沉积盆地和山地断裂带上,以水热型地热资源为主,资源量折合 1.25×10^{12} t标准煤,相当于2019年全国能源消耗的257倍,年可开采资源量折合 19×10^8 t标准煤。沉积盆地地热资源主要分布在中国东部中、新生代平原盆地,包括华北平原、江淮平原、松辽盆地等地区,资源量折合标准煤 1.06×10^{12} t^[7],是我国重要的地热开发潜力区。高温地热资源则分布在喜马拉雅地热带的新、藏、川、滇和环太平洋地热带台湾地区。地热资源总体分布具有“东高西低、南高北低”的特点,大陆地区总体热背景不高,平均大地热流密度为 $63\text{ MW}/\text{m}^2$ ^[4]。

按照热储的温度范围和埋藏深度可划分为浅层地温能资源、水热型地热资源和干热岩资源。我国这3种资源赋存丰富,分布广泛。据国土资源部的最新资源评价中国大陆336个主要城市浅层地热能年可采资源量相当于 7×10^8 t标准煤;全国水热型地热资源总量折合标准煤 1.25×10^{12} t,年可采量折合标准煤 19×10^8 t,相当于2015年全国能源消耗的44%。中国大陆3 000~10 000 m深处干热岩资源总计相当于 856×10^{12} t标准煤,根据国际干热岩标准,以其2%作为可开采资源量计,约为2015年全国能源总消耗量的4 000倍^[2-3,5,7-8]。

本文主要集中介绍地热资源的开发利用技术现状和发展,简要涉及开发利用工程现状及进展,基本不涉及勘察勘探方法,读者可参考相关文献。限于文章篇幅,干热岩资源开发利用技术将另文介绍。

1 地热资源直接利用技术现状和发展

截至2019年底,世界地热直接利用总装机容量为 107.727 GW ^[9],中国地热直接利用装机容量位居世界第一。我国2015年地热能年利用总量约为 $6.0 \times 10^5\text{ TJ}$ ^[8-10],主要利用形式为水热型及浅层地热能,其中通过热泵为民/商用建筑供冷供热为最主要的利用形式,年利用量约为 $3.1 \times 10^5\text{ TJ}$,占地热能年利用总量的51.7%^[10]。据国土资源部“十二五”“十三五”的最新资源评价,336个地级以上城市80%的土地适宜利用浅层地热能,可实现建筑物夏季制冷面积 $326 \times 10^8\text{ m}^2$,冬季供暖面积 $323 \times 10^8\text{ m}^2$ ^[11]。其中,地下水地源热泵系统夏季可制冷面积 $55.9 \times 10^8\text{ m}^2$,冬季可供暖面积 $36.1 \times 10^8\text{ m}^2$;地表管地源热泵系统夏季可制冷面积 $356 \times 10^8\text{ m}^2$,冬季可供暖面积 $375 \times 10^8\text{ m}^2$ 。就开发利用方式,城市地表管地源热泵系统适宜区占总面积的29%,较适宜区占53%;地下水地源热泵系统适宜区占总面积的11%,较适宜区占27%^[12]。除了浅层地热能,中深层水热型地热能利用也呈现良好发展趋势。

截至2015年底,全世界水热型地热能供暖装机容量为 $7\,556\text{ MW}$,占世界地热能直接利用总装机容量的10.7%^[5]。我国水热型地热资源利用方式中,地热发电占0.50%,供热采暖占32.70%,医疗洗浴与娱乐健身占32.32%,养殖占2.55%,种植占17.93%,工业利用占0.44%,其他占13.56%^[7]。作为水热型地热资源中占有份额最大的利用方式,供热采暖利用已有上千年的历史,20世纪80年代以来,水热型地热供暖的开发利用在规模、深度和广度上都有很大发展。截至2019年底,我国水热型地热资源可利用量达 14.16 GW ^[13],近10年来,我国水热型地热能直接利用量更是以年均10%的速度增长,已连续多年位居世界首位^[7]。截至2014年底,全国水热型地热资源供暖利用面积为 $6\,032 \times 10^4\text{ m}^2$,2016年增至 $1.02 \times 10^8\text{ m}^2$,2017年底超过 $1.50 \times 10^8\text{ m}^2$,其中山东、河北、河南增长较快^[12]。截至2019年,北方地区中深层地热供暖面积约 $1.52 \times 10^8\text{ m}^2$ ^[8]。

1.1 浅层地温能开发利用技术

浅层地热能指地球浅表200 m内岩土和水体中蕴含的低温热能(温度通常低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[12]。该部分地下空间通过收集太阳辐射获取热量。浅层地热能的大规模开发利用得益于热泵技术的发展。地源热泵技术问世于1912年的瑞士,地源热泵已在北美、欧洲等地广

泛应用,技术也日趋成熟,地源热泵在欧美国家家用的供暖设备中也已占有相当大比例^[14-15]。地源热泵技术的核心作用在于调整换热工质的温度,促成温度较低的地温/水热资源的可利用性,同样也是中低温水热型地热资源直接利用系统中的关键装备。

根据地下热源不同,可分为土壤源热泵系统(Ground-Coupled Heat Pump, GCHP)和地下水源热泵系统(Ground Water Heat Pump, GWHP)^[16]。我国目前应用的水源热泵系统占总数 63%,土壤源热泵系统占 37%^[17]。依据与土壤和水体的热交换方式,GCHP 有闭环循环和开放循环的构型。GWHP 热交换方式可将换热器直接置于水体中,节约设备和操作成本。若水质允许,GWHP 也可采用开放循环构型^[14]。

地源热泵系统的效率可用其 COP 指数(Coefficient of Performance,定义为产出热量与消耗电能的比值)来定量表述^[14],各种供暖系统的典型等效 COP 如下——地源热泵: 3~5,空气源热泵: 2.3~3.5,电暖器: 1,中效天然气炉: 0.78~0.82,高效天然气炉: 0.88~0.97。热泵系统近年在系统基本构成的负载侧方面发展主要是提高其 COP 指数,但总体而言发展较慢,近期的进展主要关注于: 1)利用压缩机和循环泵的废热,进一步节约能耗,提高系统 COPs; 2)将系统的应用加以扩展,如将地表的地温环境引导至地下以避免永久冻土层融化等方面影响^[14-15]。

在热源侧的热提取装置方面,主要的发展方向在于提高热交换效率和节约设备投资方面,比较典型的有为增加换热面积开发的多管地埋管换热器、螺旋形地埋管换热器、梅花管换热器^[18-19];为加大温差,强化换热同时简化系统设备而设计的直膨式地下换热系统等^[19-20]。针对中深层地热资源无扰供热而开发的单井 U 型管、单井同轴套管和重力热管技术,同样适用于水热型甚至干热岩型地热资源利用,将在后文相关专题讨论。

1.2 水热型地热资源直接利用技术

1.2.1 直接利用采暖和制冷

就利用技术层面,地源热泵技术对水热型地热资源直接利用作用巨大,已在北美、欧洲等地广泛应用,技术也日趋成熟,整体技术革新较慢,但规模发展较快。美国正在实现每年安装 40 万台地源热泵的目标,在瑞士、奥地利、丹麦等欧洲国家,地源热泵在家用的

供暖设备中已占有相当大比例。冰岛有 85% 的房屋用地暖供热,占地热直接利用的 77%。匈牙利的地热供暖虽较地热农业和浴疗应用时间晚,但发展速度很快,现已有 8 个城市,近 9 000 套住宅用地热水供暖。地热在法国的可再生能源中排第 4 位,占总能源的比例为 0.44%,居世界第 10 位,目前地热能已用于 20 万个住宅的供暖及热水供应^[8,21]。

近 10 年来,我国水热型地热能直接利用以年均 10% 的速度增长,已连续多年位居世界首位。直接利用以供暖为主,其次为健康疗养、种植养殖等。面对“2030 年前碳达峰,2060 年前实现碳中和”的目标,地热能作为清洁非碳基可再生能源迎来空前的发展机遇。水热型地热资源开发利用的主要地区,据不完全统计,截至 2020 年底,北京为 $300 \times 10^4 \text{ m}^2$,天津为 $3\,423 \times 10^4 \text{ m}^2$,河北为 $6\,000 \times 10^4 \text{ m}^2$,山东为 $6\,100 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。全国水热型地热能供暖建筑面积为 $2.40 \times 10^8 \text{ m}^2$ ^[5]。

目前,我国的地热资源梯级利用主要体现在供热和供冷两个方面。冬季,超过 50 ℃ 的地热水采用梯级利用的方式进行供暖,取得了良好的供暖效果和环境效益。夏季热泵机组通过阀门切换作为冷机使用,成为常见的风机盘管+新风系统。然而目前的梯级利用比较粗放,利用过后仍有大量的能量浪费。综合利用可以使资源利用率更高,北方地区可以优先考虑地热采暖、地热洗浴、地热种植、地热养殖等技术,南方地区可以优先考虑地热制冷、地热干燥、地热洗浴、地热种植、地热养殖等技术,优化地热资源的梯级利用。因此,地热资源的综合利用也是一种发展趋势^[16]。

地热制冷方式之一是以足够高温度的地热水驱动吸收式制冷系统,制取冷冻水用于空调或生产。常见的适用于地热制冷的制冷机有两种:一种是以水为制冷剂、溴化锂溶液为吸收剂的溴化锂吸收式制冷机;另一种是以氨为制冷剂、水为吸收剂的氨水吸收式制冷机。工作原理为这两种溶液系统中制冷剂的饱和蒸气压受溶液浓度和温度的影响非常大,稀浓溶液相应的饱和蒸气压足以产生较高的真空度,驱动蒸汽流动并导致制冷剂在含浓溶液的低压蒸发器中强烈蒸发制冷;浓溶液吸收制冷剂而稀释为稀溶液,泵入高压发生器,由外部热源加热沸腾,再次分离成浓溶液和制冷剂蒸汽;后经一系列换热器、冷却塔、循环泵等设备完成循环^[22]。

在压缩机式制冷设备推广以前,吸收式制冷系统,特别是氨水吸收式制冷机作为小型工业制冷方法广泛应用于医疗、食品等行业,技术相对成熟。依据外部热源来源不同,传统上此类设备分为直燃式吸收式制冷系统(锅炉加热)、废热利用式吸收式制冷系统等。针对利用地热能的吸收式制冷系统,需要进行相应的设备调整,包括调整溶液浓度以改变沸点以适应地热流体温度,或装置额外热泵系统调整发生器热源温度等。相应技术和设备已经市场化,但设备整体体积较大,线路复杂,运营维护成本较高,与目前已普及的压缩机式制冷系统相比,在技术经济方面不占优势。到2014年,地热制冷在地热利用中所占的比例不到0.4%,在夏季时间长、地热资源比较丰富的地区,如美国的南部,中国的广东、福建等地,结合节约用电的政策倾斜,地热制冷技术可能有较广泛的应用前景^[23-24]。

1.2.2 尾水回灌技术发展

典型华北平原地热田的生产操作经验和模型计算表明,多数沉积盆地型水热地热热储即使经过长达几十年的开采,实际仅利用了深部热储热能的较小部分。中低温地热资源主要依靠流体携带热能来供人们开发利用,携带热能的地热流体枯竭速度远高于热能消耗速度,尾水回灌是开发保护地热资源的必要措施。地热回灌的目的主要体现在以下3个方面:1)废水处理的方法之一,可减少地热流体排放对土壤、地表水体和地下浅层水体的热污染和化学污染;2)维持区域储层压力,是除自然补给外最直接、有效的人工补给;3)可持续开发利用,可增加从岩石中提取热量的能力,真正体现地热资源清洁、可再生的特性^[25-26]。

京津冀鲁豫等省市地热资源相对丰富,开发利用主要用于供暖,水质条件适合回灌,但现有地热回灌井数量偏低,仅为开采井的15%左右。设计有回灌井的地热田中开采量有50%以上能够回灌,个别地区某些热储可以达到100%回灌,但全国总的回灌率还明显偏低,很多地区出现热储压力(水位)多年连续下降现象。同时响应国家“碳达峰”“碳中和”的要求,开采力度逐渐增加,环保压力增大,加上地方政府的重视和回灌技术规范,供暖后的地热尾水都进行了生产性回灌或部分生产性回灌。目前基岩热储回灌效果较好的是北京、天津、山东及河北雄县等,砂岩热储回灌效果较好的是天津,山东济南、德州,河北沧州、保定等^[27-28]。

当前相应的技术发展主要关注3个方面:1)综合层位识别和动态监测,改造储层打通回灌通道,预防回灌性能下降,处理回灌过程中黏土变性、颗粒迁移、矿物沉积和微生物集结等问题,攻克砂岩回灌难题^[24-25];2)通过动态监测,模型预测等方法,科学规划开采方案,解决基岩热储采灌区域集中、层位集中、时间集中的现象;3)综合考察动态回灌过程,科学评价回灌条件下的可持续发展的资源潜力^[26,28]。

1.2.3 油田区地热资源的开发利用

地热能储量丰富、分布广泛,具有稳定连续的优势,是实现碳达峰、碳中和目标不可或缺的能源,但潜在的高昂打井成本和较高的地质风险阻碍了传统地热能开发利用。我国油田区蕴藏着大量的地热资源,拥有数量众多的油气勘探、生产井,且井下温度较高,富水性基本满足需要,具有巨大开发潜力。如果能利用这些既有设施,节约钻探投资,规避地质风险,实现油田区地热资源低成本、可持续的开发利用,则会推进油田企业开发可再生地热能新产业,对实现碳达峰、碳中和目标及清洁供暖等具有重大意义^[5,29]。

对于油气开采已经没有价值的油井,经过改造利用后对地热资源的开采有重要意义。这类油井大量存在于油田区,可划为“无用”油井,主要包括:1)因地质、工程原因损毁,无法生产的报废、废弃井;2)钻探后无油气显示的勘探井;3)多年生产后停产低产的停产井。对比地热井的生产要求,油气井普遍产量较低,工程改造主要在于改造井结构和近井储层,提高产能。主要改造方法包括:1)开天窗侧钻法;2)直接射孔法;3)改造泵室射孔法。具体方法取决于井身结构、地层情况、技术经济等因素。其他常用的油气井增加产能的方法如射孔、酸化、套管切割等亦屡见于改造工程实践中^[30-33]。

中国东部地区实施油田地热利用最早起步于20世纪80年代,包括原油管道加热、油管清洗、油水分离、房屋供暖、温室大棚以及中低温地热发电等。开发利用地热的方式主要是利用采油过程中分离出的热水,或将油井、废弃井改造为地热井^[34-35],或新钻地热井抽取地热水等,采用的技术包括换热器间接供热技术、井下换热技术、热泵技术和中低温地热发电技术等。在累计实施的油田地热项目中,利用的地热能(折算为标准煤)超过 160×10^4 t/a。这些项目主要集中在渤

海湾盆地的华北油田、胜利油田、大港油田、辽河油田、冀东油田。2011 年华北油田建成一座 400 kW 的油田中低温地下热水示范地热电站,是当时大中型沉积盆地深部油气田伴生地热资源创新性开发利用工程^[29-30]。

目前仍缺乏地热能开发利用方面的总体规划和标准规范,实现油田地热能的可持续利用,需要根据资源条件制定统一的开发利用规划。此外,在地热资源勘探、资源评价、热水回注、地热能开发项目评价指标等方面没有标准和规范,也没有职能机构和运营管理机构,这将直接制约油田地热资源的开发^[30,33]。

1.3 中深层地热资源无扰开发技术进展

追溯中深层地热埋管供热技术的发展沿革,利用同轴深孔换热器提取深部岩土热量的概念于 1995 年由瑞士学者在文献中首次报道^[36],其初衷是利用油气钻井开发中的废弃干孔提取中深层岩土中赋存热量,并于瑞士维吉斯开展了试点项目实验^[37]。该原型概念在国外并没有得到重视,仅有个别实验井进行工程尝试,并未考虑与特制热泵机组联合使用为建筑供热,更无任何商业化应用案例^[38-39]。

中国北方城镇地区建筑密度高、人员密度大、供热需求旺盛,因而特别适合该技术在建筑供热领域的应用。2012 年,陕西省工程技术和科研人员探索出使用同轴套管式深层埋管换热器耦合特制地源热泵机组进行建筑供热的中深层地热埋管供热技术,并成功实现商业化规模应用^[40-42]。2017 年 1 月,《地热能开发利用“十三五”规划》提出在发展地热能时,应开展井下换热技术深度研发,在“取热不取水”的指导原则下,进行传统供暖区域的清洁能源供暖替代。2018 年 1 月,多位院士专家参加无干扰地热供热技术论证会,对中深层地热能开发利用进行技术可行性分析,将其技术名称确定为“中深层地热能无干扰清洁供热技术”。2020 年 3 月,陕西省工程建设标准《中深层地热埋管供热系统应用技术规程》(DBJ 61/T 166—2020)正式发布^[43]。此类系统的工作原理本质是深入中深热储的全封闭式闭路井下换热器(Downhole Heat Exchanger, DHE)。

1.3.1 中深层埋管式井下换热器技术进展

中深层埋管换热器通常采用同轴套管结构或 U 型管结构。对于同轴套管结构而言,换热介质在循环

泵的驱动下从外套管向下流动与周边土壤和岩石等换热,到达垂直管的底部后,再返到内管向上流出换热装置。换热介质在外套管向下流动过程中,一方面通过外套管壁与土壤岩石等进行换热获取热量,另一方面也会通过内管管壁与向上流动的换热介质换热而散热。对于 U 型管结构而言,换热介质顺入水管一路与周边土壤和岩石换热,底部水平段位于地温高温区,可能带来更大的换热增益,因此近年来 U 型管式中深层埋管换热器也在部分工程项目中得到了试点应用^[44-46]。由于采用密闭换热装置才能对地下环境产生最小的影响,为保证系统长期稳定运行,换热装置的密闭性与稳定性要求较高的工程技术工艺。

相关的数值模拟和理论分析研究也屡见于文献^[41,47-49]。场地试验研究方面,研究人员对西安市一处应用中深层埋管供热技术示范工程的实测数据开展了模拟研究,之后又开展了系统设计和稳定性优化研究^[41]。对中深层埋管换热器取热量的数值模拟结果表明,其每延米换热量不会超过 150 W/m,指出了工程应用上限^[49]。对若干实际应用开展了一系列工程监测,结果表明该技术较传统浅层地源热泵系统而言系统 COP 更高,可达 4.6~6.4^[41]。数值模拟研究也分析了中深层埋管换热器的性能影响因素,对包括固井材料、管材导热系数等参数进行敏感性分析^[50-51]。目前针对中深层埋管换热器,国内外的研究重点主要集中在单根中深层埋管换热器长期稳定性研究以及中深层埋管换热器耦合深部岩土高效仿真计算模型开发。

在实际应用中,如以换热量 120 W/m,系统 COP 为 6.0,建筑热负荷 30 W/m² 计,一根 2 500 m 的中深层埋管换热器仅可满足 12 000 m² 的供热需求,对于现今的公共建筑及住宅建筑而言,大多需要 5~8 个中深层埋管换热器以满足建筑总供热负荷。研究人员基于多场物理模拟软件 OpenGeoSys 开发了中深层埋管管群换热模型,以使得深层埋管换热器管群模型可以考虑管间水力交互及管间热相互作用,并针对管群热交互评估等技术难点开展研究工作^[52]。结论表明在中深层埋管换热器管群系统设计中应考虑管间换热造成的热相互作用,通过拉大管间距等方式提高系统换热效果^[53-54]。综合目前研究成果,我国在该领域的技术研究已位居世界先进水平,未来针对中深层埋管供热系统,其系统设计方法、管群换热性能影

响因素分析以及耦合储能等方式的多能互补系统研究将是该技术下一步的研究重点。

1.3.2 超长重力热管井下换热器技术进展

重力热管开采地热能的工作原理如下:重力热管结构自下而上依次为蒸发段、绝热段和冷凝段。初始时在抽真空的热管内注入适量的液态工质,工质在底部蒸发段受到外界热源的加热迅速气化,在压力和浮力的作用下,加速向上运动,流至冷凝段与管壁外的冷源发生热交换,凝结液化,液相靠重力回流到蒸发段重新吸热。如此循环往复,将热量从底部蒸发段传递到上部冷凝段,供发电和采暖使用。由以上的开采过程可知,利用重力热管提取地热能资源并不需要消耗泵功等,可降低成本。此外整个过程中只取热不取水,可避免地面沉降、水资源污染等问题^[55-56]。

重力热管是自循环的 DHE 系统,流体工质循环过程完全封闭,从根本上杜绝了管道的腐蚀和结垢,以及工质损失等问题。并且 DHE 系统为单井采热,无须进行井下连通,可以很方便地建立在废弃的石油和天然气井口,从而大幅减少了钻井费用,降低项目投资风险。一些研究者已经对使用 DHE 系统来开采干热岩热能的方案展开了实验和理论研究^[57-58]。

多数针对 U 型管和套管井下换热系统的数值模拟显示 DHE 的单井采热量通常较低,多数在 1 MWt 以下,发电量小于 50 kW^[49]。热储和工质的平均温差是该系统热量传递的驱动力,采用 U 形管或套管的单相流 DHE 系统将地热能以显热的形式储存在循环工质中,当循环工质吸收地热能之后工质温度也会随之上升,难以在热储和井下换热器之间形成较大温差。重力热管井下换热系统利用管内工质在重力作用下由液气相变而产生的自然对流效应,可将热量迅速地从高温端传输到低温端。由于重力热管将热能储存在工质潜热中,其工质温度不会随着热量的吸收而增长。因此重力热管能够在采热过程中维持更高的传热温差,强化传热过程,同时较高的工质-地层温差使近井热储温度较传统换热方式低,进一步强化热储中自然对流过程,从而提高采热效率。一些相关理论研究显示:理想条件下 EGS 电站中单井重力热管发电量可达 243 kW,成本电价 1.1 CNY/kWh,与 EGS 电站发电成本接近,但其投资总额仅为 EGS 电站的约 1/6^[49]。

应当注意的是,目前超长热管井下换热系统的研

究工作以数值模拟方法为主,其中包含大量模型假设,包括忽略积液效应和气液卷携作用等,使得模拟结果仅有参考意义。常规结构的重力热管传热能力受各种传热极限约束,理论上主要有沸腾极限、携带极限、黏性极限、声速极限和干涸极限,简化的理论分析给出了各种极限的估算方法^[59-62]。地温条件下,重力热管换热能力和蒸发段长度主要受携带极限控制。超过极限条件的操作往往破坏稳定的两相流动和传热过程,削弱传热能力。携带极限是由重力热管内的蒸汽流与逆向的凝结液流在两者界面上的黏滞携带作用引起的,一旦上部空间的液体体积达到一定量以后,就可能突然快速下降至蒸发段,破坏热管内正常的两相流动和传热过程;沸腾极限是在径向热流密度较大的情况下,蒸发段液池中的工作介质首先发生沸腾,当达到某一临界热流密度时就会产生大量气泡,在蒸发段壁面上形成蒸汽膜,影响热管的整体传热系数,使热管的传热能力下降;当蒸汽量和热功率很大时,回流液在接近液池前被烧干,导致热管局部温度持续升高,此时出现干涸极限^[60-61]。实验室超长热管换热试验中,当长径比和功率较大时出现的强烈震荡现象是这些非线性特征的体现^[56]。

对于超长热管(长径比 15 000 左右)的模拟计算显示,3 000 m 长重力热管中热蒸汽最多可传递 530 m 左右,通过加装蒸汽导管和钢丝网导流装置,特别是绝热段的保温,系统采热能力大为改善^[63]。鉴于以上及类似模拟结果,研究者们提出了很多改进方案:重力热管内部设置液体回流管路用于避免气液卷携现象;在回液管侧壁设置多个喷嘴,通过喷淋的方式保持蒸发段内壁的润湿,进而避免蒸发段的积液问题^[64-67];设置内管和翅片结构,采用纳米流体对热管相变性能进行调整^[68];加入表面活性剂以强化沸腾传热^[69];采用金属网吸液芯和分流管等改进结构^[59,64];采用“多级循环”的设计思路,将长管分隔为多段短管,各段分别采用适宜的工质,解决长径比过大所带来的一系列流动传热问题^[70-71]。各个方案对系统中存在的问题均有一定程度的改善,但不能完全解决,同时因引入了复杂几何、机械结构,又导致新问题出现。

如上文所述,超长热管涉及复杂的两相湍流相变传热耦合过程,一些实验研究中出现的较强震荡现象明显展示系统的非线性特征。系统放大不能仅仅以长

径比表征,常用 CAE 软件对有相变的湍流换热系统模拟的准确度尚需综合考察,实用尺度的场地实验不可或缺,但同时大尺度超长热管实验系统,特别是千米级规模的设备设施,需要较大规模资金支持,现场组织和安装调试相当繁复.超长重力热管技术以目前理论和技术水平还在研究探索阶段.

2 地热能发电技术

2.1 地热能发电开发利用现状

地热发电有多种技术,取决于资源状况.地热发电系统可分为蒸汽型、热水型、地压型、干热岩型和岩浆型等系统^[72]. 1)蒸汽型:指地下储热以蒸汽为主的对流系统,蒸汽主要为 200~240 ℃干蒸汽,掺杂少量其他气体; 2)热水型:在地下储热以热水为主的对流系统,包括喷出地面呈现的热水和湿蒸汽,是目前利用最广的地热发电形式,热水型可分为高温(大于 150 ℃)、中温(90~150 ℃)和低温(90 ℃以下); 3)地压型:封闭在地下的高温高压热水体,溶有大量碳氢化合物; 4)干热岩型:地下普遍存在的无水和蒸汽的热岩石,需靠人工压裂创造裂缝,从而使得低温水吸收岩石热量后至地面发电; 5)岩浆型:在地下以熔融和半熔融状态存在的岩浆,一般埋藏较深,较浅区多为火山地区,此类地热资源开发尚处于理论探讨阶段.

2014 年世界地热发电资源总量达到 12.7 GW,主要来自低温和中低温资源^[73].自 2010 年以来,大约增长了 17%.图 1 显示了 1995—2020 年地热技术的增长.该研究呈现出从 2010—2014 年每年约 350 MW 的近线性趋势,同时还声称拥有 21 GW 的电力容量到 2020 年.到 2050 年,全球可安装 140 GW,届时地热发电将占世界发电量的 8.3%,覆盖 17%的人口,其中 40 个国家 100%的电力来自地热资源^[73].此外,地热技术每年可以从大气中消除超过 10×10^8 t 的二氧化碳.即使基于更保守的估计,2050 年全世界 3%的发电量和 5%的热负荷也将来自地热资源^[74].

目前地热发电装机容量较大的国家为美国、新西兰、冰岛、菲律宾、印度尼西亚、墨西哥、萨尔瓦多、肯尼亚等国家(表 1).美国、冰岛、意大利、新西兰地热发电历史较长,规模较大,但增量平缓.印度尼西亚、菲律宾、肯尼亚以及土耳其是地热发电新兴国家,地热发电有很大增长空间^[5,75].

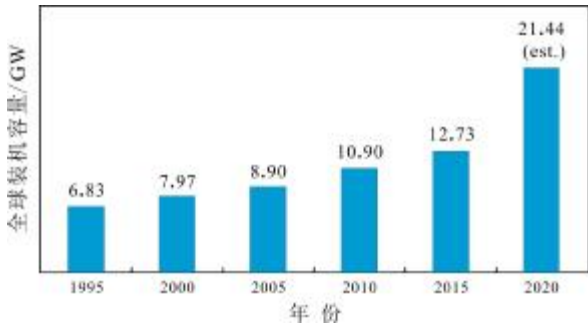


图 1 1995—2020 年全球地热发电装机容量
Fig. 1 Global installed capacity of geothermal power generation during 1995–2020

表 1 2020 年地热发电装机容量排前十的国家
Table 1 Top 10 countries in installed capacity of geothermal power generation in 2020

序号	国家	装机容量/MW	序号	国家	装机容量/MW
1	美国	3700	6	墨西哥	1105
2	印尼	2289	7	新西兰	1064
3	菲律宾	1918	8	意大利	916
4	土耳其	1549	9	冰岛	755
5	肯尼亚	1193	10	日本	550

据文献[73,75].

各国地热发电采用的不同发电循环的数量见图2,每种循环对应的装机容量和发电量见图 3.表 2 总

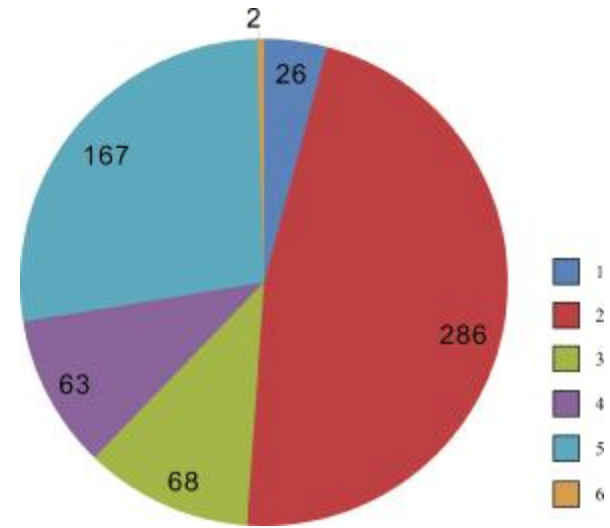


图 2 不同地热发电循环系统数量
Fig. 2 Numbers of different power generation cycle systems
1—背压式(back pressure type); 2—双循环(double cycle); 3—双极闪蒸(two-stage flash); 4—干蒸汽(dry steam); 5—单级闪蒸(single-stage flash); 6—三级闪蒸(three-stage flash)

结了不同发电循环在各大洲的分布情况^[73,75]。可以看到,干蒸汽、背压式、单级和多级闪蒸地热电站就电站数量而言占一半左右;就发电量而言,这三者占比超过85%,凸显出全球地热发电仍然主要依靠高品质(高温)地热资源。



图3 发电循环类型的装机容量和发电量占比

Fig. 3 Installed capacity and percentage of power generation by power generation cycle type

1—背压式(back pressure type); 2—双工质(binary cycle); 3—双级闪蒸(two-stage flash); 4—干蒸汽(dry steam); 5—单级闪蒸(single-stage flash); 6—三级闪蒸(three-stage flash)

表2 各大洲地热发电装机容量

Table 2 Installed capacity of geothermal power generation by continent

洲	背压式	双工质	双级闪蒸	干蒸汽	单级闪蒸	三级闪蒸	总计
非洲	48	11	-	-	543	-	602
亚洲	-	236	525	484	2514	-	3758
欧洲	-	268	273	795	796	-	2133
拉丁美洲	90	135	510	-	908	-	1642
北美	-	873	881	1584	60	50	3450
大洋洲	44	266	356	-	259	132	1056
总计	181	1790	2544	2863	5079	182	12640

装机容量单位:MW.

中国中低温地热发电研究工作始于20世纪60年代末期.1970年5月首次在广东丰顺建成第一座设计容量为86 kW的扩容法地热发电试验装置,地热水温91℃,厂用电率(地热电站自身耗电量与电站总发电量的比值)为56%.随后在河北后郝窑、广东邓屋、湖南灰场、江西遂川、广西象州、山东招远等地建立了地热试验电站,总装机容量1.55 MW,后来因技术经济等原因多个电站相继停止运行.目前仅广东丰顺维持在

可部分运行状态.

1977年9月第1台1 MW高温地热能发电机组在西藏羊八井发电成功,中国成为世界上第八个掌握高温地热能发电技术的国家.1991年,羊八井地热能电站装机容量达25.18 MW,其供电量曾占拉萨市电网的40%~60%.截至2005年底,西藏利用地热发电的有3处,分别是羊八井、那曲和朗久3个地热田,总装机容量约为25 MW^[4-5,8].目前仅羊八井电站可部分运行^[76].

“十二五”期间,我国在西藏羊易、华北油田、青海省共和县、天津等地,陆续试验了一批地热发电机组.2017年,原国土资源部及国家能源局共同颁布的《地热能开发利用“十三五”规划》提出:“十三五”时期,在新增地热能供暖(制冷)面积 $11\times 10^8\text{ m}^2$ 的同时,新增地热发电装机容量500 MW^[2].当前我国地热发电装机容量虽达46.68 MW,但与“十三五”提出的目标相比还有不小差距^[76].

目前西藏羊易16 MW项目、山西大同300 kW项目已经启动,四川康定建造了一个400 kW的测试发电装置,云南德宏兴建了2 MW的电厂.至2021年初,国内地热发电装机容量约为51.2 MW(包括西藏羊八井的25.2 MW电厂).

2018年10月,西藏羊易地热电站工程一期16 MW发电机组顺利通过72 h满负荷试运行,标志着目前世界上海拔最高、国内单机容量最大的地热发电机组顺利投产发电.2021年初,山西大同天镇300 kW地热ORC试验电站投入运行.青海共和、唐山马头营干热岩试验电站也已完成初步建设,正在积极扩建提高发电能力.我国地热发电行业呈现出加速发展的态势.

2.2 地热能发电技术发展

2.2.1 蒸汽型地热发电系统

在地流体以过热蒸汽形式存在的较高温度下,使用干蒸汽系统(背压式汽轮机发电系统)发电^[77].背压式发电系统技术成熟、运行安全可靠,是地热发电的主要形式之一,贡献了全球总量约23%的地热发电能力,目前有63座电厂在运行中,至2014年发电功率总计达到2 863 MW^[73,75].

干蒸汽热电系统是地热发电厂最简单、成本最低的设计之一.干蒸汽自生产井引出后,在汽水分离器

中分离出固体杂质,干蒸汽送入汽轮机做功,驱动发电机发电,做功后的蒸汽可直接排入大气,也可用于工业生产中的加热过程.背压式发电系统多用于蒸汽中不凝结性气体含量高的工况,或用于热电联供系统.由于利用高温热源,干蒸汽发电厂通常比其他类型的地热发电厂具有更高的效率^[17],但同时高温地热资源相对较少,系统实施存在限制.此外,来自地球的热蒸汽会增加涡轮叶片的腐蚀,从而增加运营费用^[3].为提高机组的发电效率,系统中配备冷凝器,汽轮机排气可通过冷凝器内的循环冷却水降温.冷凝器采用抽气方式维持真空,可使蒸汽在汽轮机中膨胀压力较低,提高发电效率,即凝汽式汽轮机^[72, 75, 77-78].

2.2.2 闪蒸式地热发电系统

闪蒸式地热发电系统也称扩容式地热发电系统,它是将来自地热井口的地热水或汽水混合物,先送至闪蒸器中进行降压闪蒸(或称扩容)使其产生部分蒸汽,再引入到汽轮机做功发电.闪蒸式地热发电系统又可以分为单级闪蒸和多级闪蒸两种方式.与单级闪蒸不同,多级闪蒸系统中的地热水先进入一级闪蒸器,产生的蒸汽进入汽轮机高压缸,从一级闪蒸器出来的热水进入二级闪蒸器,之后二次闪蒸蒸汽进入汽轮机做功^[77-78].

闪蒸式地热发电系统循环效率略低于干蒸汽发电技术,一级闪蒸系统循环效率为 12%~15%,二级闪蒸系统为 15%~20%.采用闪蒸式发电系统的地热电站设备简单,可采用混合式热交换器,但设备尺寸大、易腐蚀结垢、热效率低.由于是直接以地下热水蒸气为工质,因而对于地下热水的温度、矿化度以及不凝气体含量等要求较高^[73, 77].

目前,闪蒸式发电技术已在地热发电领域得到广泛应用,尤其是中高温地热田.西藏羊八井地热电站的 3—9 号机组主要采用闪蒸式发电技术.日本的八丁原地热电站是世界上首次采用二次闪蒸的日本最大的地热电站,通过采用二次蒸汽充分利用热能,可提高电站出力 18%左右^[77].

2.2.3 中间介质法地热发电系统

中间介质法发电主要用于中低温地热发电.其特点是地热水与发电系统不直接接触,而是将其中的热量传给某种低沸点介质(如丁烷、氟利昂等).当低沸点介质汽化为蒸汽时,就可推动汽轮机发电.由于这

种发电方式由地热水系统和低沸点介质系统组成,也称为双循环式地热发电.双循环发电常用的介质除上面提到的氯乙烷、正丁烷、异丁烷之外,还有氟利昂-11 和氟利昂-12 等.双循环发电系统主要有两种形式,即有机朗肯循环(ORC)和卡林娜循环(Kalina Cycle).

有机朗肯循环利用的地热热源温度范围为 85~170 ℃.最常用的工质是异丁烷、异戊烷或二者的混合物,工质沸点较低.一般来说,以异丁烷为工质的系统比异戊烷做工质的系统效率高.混合工质组成可根据地热流体特性调整,其系统效率高于纯工质.表 3 列出了一些用于 ORC 循环的主要工质的临界温度和压力. ORC 系统的工质加热过程与热源温度变化过程的配合程度较好,换热的不可逆损失小,系统循环效率高

表 3 ORC 循环中不同工质的临界温度和临界压力
Table 3 Critical temperature and pressure of different working fluids in organic Rankine cycle

工质	临界温度/℃	临界压力/MPa
异戊烷	187.2	3.370
异丁烷	134.7	3.640
n-戊烷	196.5	3.364
n-丁烷	152.0	3.796

卡林娜循环是在传统的 ORC 双循环基础上的改进.卡林娜循环常以氨水混合物为工质,氨水在蒸发器中被地热流体加热,经分离器分离为饱和氨水蒸气及饱和氨水液体.分离出的饱和氨水蒸气通过汽轮机做功发电,饱和氨水通过高温回热器冷却和节流阀减压后,与汽轮机出口的氨水蒸气混合,重新形成与循环起始浓度相同的氨水气液两相混合物,再经泵加压和回热器加热后,形成高温高压的氨水重新开始循环.卡林娜循环能够更充分地利用地下热水的热量,降低发电的热水消耗率,但系统结构复杂,投资费用较高.理论分析认为卡林娜循环比纯工质 ORC 循环系统性能(单位热消耗量净电能生产量)高出 15%~50%.但实际运行中,由于流动阻力和泵的功耗问题,卡林娜循环并未表现出较高的性能,其优势在于单位净电能生产成本略低^[75, 78].

2.2.4 地热发电系统技术发展

近年来地热发电系统的地面设备部分的技术发展

主要在于:1)降低设备投资,提高发电效率;2)提高系统整合程度,开发精简紧凑的发电模块,推广普及中小型地热发电利用;3)发挥地热能供给稳定易调节的特点,结合其他形式清洁能源(太阳能、生物质能等),打造稳定可靠清洁能源发电系统^[75]。

当前研究的主要方向集中于将地热能与太阳能、生物质能、热电发电机(Thermo-Electric Generator, TEG)、制氢、三联产以及其他直接使用形式相结合^[75, 79-80]。当收获地热资源时,通常在地流体中剩余的焓可用于不同的应用。一个例子是在 ORC 发电厂中发电的中温地热资源,其中地热盐水的出口温度足够高,足以用于热泵加热应用。通过将剩余的热量用于食品或农业干燥目的,或者可能用于水产养殖,甚至可以进行第三或第四级提取^[79]。

以地热-太阳能组合系统为例,主要包括两种组合形式。一种是联合发电的组合形式,此类组合有3种操作方式:1)使用太阳能再加热地热发动机的工作流体;2)使用太阳能进一步加热地热水或提高其中蒸汽含量;3)使用地热预热太阳能电站中 ORC 的循环回流工质。位于智利北部的一处试验电站的生产实践表明,前两者可以增加地热电站发电能力和热电转化效率,对单级和二级闪发电系统可带来 0.23 kWe/kWh 和 0.29 kWe/kWh 的提升^[80-81]。另一种是从提高地热-太阳能整体系统效率出发来设计开发的地热-太阳能多级混合的组合方式,该系统的出发点是利用较高品位的热能发电,用较低品位的热能来提供空间供暖、工业供暖、热水和制冷的能源需求,其实质是改良版的有多种能源的梯级利用。此类系统在许多有条件的研究区有相当多的示范工程。Al-Ali 和 Dincer 对多代太阳能-地热混合系统进行了焓和能量分析^[82]。该系统利用温度 190 °C 的地热热能和 395 °C 的太阳热能为热源,结合多个能量循环(包括两个有机朗肯循环)利用多种形式的能量,能源效率从 16.4% 提高到 78%。当从单效(仅发电)到多效时,多效系统可以更好地利用地热能的低品位热量,显示多效联产的高效率。研究也显示此类系统的成功实施需要场地同时具有较好的太阳能和地热资源条件,由于来源于多种多品质热源热流同时输入,维持系统效率要更注重低品位热量的利用,对冷端散热要求也较高。我国相关领域研究人员也开展了地热-太阳能组合发电方式的研究工作^[83-85]。

近年来对整合 TEG 和制氢系统及工艺的 ORC 发电厂进行了多目标优化研究,从能源、焓和经济的角度将优化后的系统与基本的 ORC 系统进行比较^[86]。得出的结论是,使用 TEG 优化 ORC 循环以产生额外的电力可将焓效率提高 21.9%,同时优化循环和制氢(使用电力来自 TEG)的焓效率比基础 ORC 提高了 12.7%。对 TEG 和卡林娜循环发电集成的研究表明,使用 TEG 时,能源效率、焓效率和净功率输出提高了 7.3%。当 TEG 的成本低于 6.4 美元/W 时,该技术经济指标为最优^[87]。同时,相关研究考察了用 TEG 替换 ORC 中的冷凝器以及安装 TEG 从地热盐水中回收废热的技术路线,计算了焓效率、总产品成本和投资回收期。焓效率比基础 ORC 系统提高了 4.67%。TEG 系统的投资回收期比基础 ORC 低 15 天,功率输出增加了 9%^[88]。

3 结论

中国地热资源储量丰富,应用历史悠久,范围宽广,在国家节能减排和清洁低碳发展方针的指引下,我国地热能产业得到了快速发展,各级政府不断重视,从业人员逐渐增多,规模化工程项目发展较快。

就地热资源直接利用方式而言,地源热泵利用效率高(较高 COP 值),同时具有地域适宜性较强、供热制冷兼备、节能环保等优势。根据具体热储条件,以地源热泵形式将蕴藏在地下水、地表水或土壤中的地热能用于建筑供能是最直接的利用形式。目前浅层地埋管地源热泵供暖技术是使用最广泛、技术最成熟的工程方式。在实现碳达峰、碳中和目标的过程中,浅层地热能可望作出相当贡献。中深层地源热泵供暖技术和水热型地热直接供热/制冷技术近年来获得了快速发展,但目前仍存在冷热不平衡、热枯竭、采灌不均衡、某些地区回灌困难、结垢阻塞等问题,未来在系统经济性与可持续利用方面仍需进一步研究。新近发展的超长井下换热系统还在研究开发阶段,尚有具体的理论和工程技术需要攻关解决。

如前文所述,地热发电的能源利用系数平均高达 73%,而直接利用仅为 23%,且与其他可再生能源(风能、太阳能等)相比具有来源稳定、负载调节灵活等优势,可以作为一种基础载荷加以应用。全球范围内地热发电应用方面,尽管双工质电站装机数量占地热电

站总数近半,但基于闪蒸方式的电站发电能力占地热电站总发电能力的 80%以上,仍是地热发电的主力方式,这是由高温地热资源热量品位高、发电能力强所决定的。我国中高温水热型地热资源总量和地域分布有限,应当从技术革新、政策引导等方面推进中低温地热发电的规模化发展。地热资源与其他绿色可再生能源(太阳能、生物质能等)联合联产,可以有效提高中低温地热资源的热品质,进而提高系统发电效率和稳定性,已有成功的示范工程。地热能 OCR 发电和 TEG 发电联合制氢可以在单一热量来源条件下提高系统效率,这都可能是新一代中低温地热发电的发展方向。

(扫描首页 OSID 二维码可查看本文涉及的相关设备、工作原理、流程等示意图)

参考文献(References):

- [1] 国家能源局. 国家能源局综合司关于公开征求《关于促进地热能开发利用的若干意见(征求意见稿)》意见的公告[EB/OL]. (2021-04-14) [2022-05-01]. http://www.nea.gov.cn/2021-04/14/c_139880250.htm.
- Nation Energy Administration. Several opinions on promoting the development and utilization of geothermal energy (Exposure draft) [EB/OL]. (2021-04-14) [2022-05-01]. http://www.nea.gov.cn/2021-04/14/c_139880250.htm. (in Chinese)
- [2] 国家发展改革委发布. 地热能开发利用“十三五”规划[EB/OL]. (2017-02-04) [2022-05-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/W020190905497910773317.pdf>.
- National Development and Reform Commission. The 13th Five-Year Plan for geothermal energy development and utilization [EB/OL]. (2017-02-04) [2022-05-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201702/W020190905497910773317.pdf>. (in Chinese)
- [3] 李德英. 我国清洁能源与清洁取暖发展机遇与挑战[EB/OL]. (2021-01-14). <http://www.cnste.org/html/jishu/2021/0114/7438.html>.
- Li D Y. Development opportunities and challenges of clean energy and clean heating in China[EB/OL]. (2021-01-14). <http://www.cnste.org/html/jishu/2021/0114/7438.html>. (in Chinese)
- [4] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Wang J Y. Geothermics and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [5] 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 等. 中国地热能发展报告-2018 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
- China Geological Survey, Ministry of Natural Resources of the Republic of China, Department of New Energy and Renewable Resources, National Energy Administration, Institute of Science and Technology Strategy Consulting, Chinese Academy of Sciences, et al. China geothermal energy development report[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.
- [6] 蒯文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
- Lin W J, Liu Z M, Wang W L, et al. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312-321.
- [7] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
- Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 449-459.
- [8] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1-9.
- [9] Lund J W, Toth A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review [J]. *Geothermics*, 2021, 90: 101915.
- [10] 赵军, 李扬, 李浩, 等. 中低温能源在中国[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 250-260.
- Zhao J, Li Y, Li H, et al. Mid-/low-temperature energy in China [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(2): 250-260.
- [11] Zheng K Y, Dong Y, Chen Z H, et al. Speeding up industrialized development of geothermal resources in China: Country update report 2010-2014 [R]. Melbourne: Proceedings World Geothermal Congress, 2015.
- [12] 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 等. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1062-1073.
- Wang W L, Wang G L, Zhu X, et al. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China [J]. *Geology in China*, 2017, 44(6): 1062-1073.
- [13] Zhu J L, Hu K Y, Lu X L, et al. A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects [J]. *Energy*, 2015, 93: 466-483.
- [14] Self S J, Reddy B V, Rosen M A. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options [J]. *Applied Energy*, 2013, 101: 341-348.
- [15] Hepbasli A, Kalinci Y. A review of heat pump water heating systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6/7): 1211-1229.
- [16] Tian T S, Dong Y, Zhang W, et al. Rapid development of China's geothermal industry: China national report of the 2020 world geothermal conference [R]. Iceland: Proceedings World Geothermal Congress, 2020.

- [17]李扬,赵婉雨. 地热能领域产业技术分析报告[J]. 高科技与产业化, 2019(9): 46-51.
- Li Y, Zhao W Y. An industrial and technical analysis report of geothermal energy[J]. High-Technology & Commercialization, 2019 (9): 46-51.
- [18]周亚素. 土壤热泵动态特性与能耗分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- Zhou Y S. Study on dynamic performance and energy consumption of the ground-source heat pump[D]. Shanghai: Tongji University, 2001.
- [19]Zarella A, De Carli M, Galgaro A. Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 301-310.
- [20]Aydn M, Sisman A. Experimental and computational investigation of multi U-tube boreholes[J]. Applied Energy, 2015, 145: 163-171.
- [21]Lund J W, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review[J]. Geothermics, 2016, 60: 66-93.
- [22]徐健,司华峰,郭开华,等. 地热驱动吸收式制冷技术在广东地热开发中的应用探讨[J]. 制冷, 2002, 21(4): 34-36.
- Xu J, Si H F, Guo K H, et al. Discussion on the application of absorption refrigeration driven by geothermal energy to the development of geothermal energy in Guangdong Province[J]. Refrigeration, 2002, 21(4): 34-36.
- [23]姚远,龚宇烈,陆振能,等. 中深层地热制冷技术在我国南方地区的应用与展望[J]. 科技促进发展, 2020, 16(3/4): 352-358.
- Yao Y, Gong Y L, Lu Z N, et al. Application and prospect of mid-deep geothermal refrigeration technology in South China[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(3/4): 352-358.
- [24]汪集畅,罗霁. 地热理应在雾霾治理和南方供暖/制冷中发挥更大的作用[C]//2015年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京:中国地球物理学会,中国地质学会, 2015.
- Wang J Y, Luo J. Geothermal should play a greater role in haze control and heating/cooling in South China[C]//2015 China Geoscience Joint Academic Annual Meeting. Beijing: China Geophysical Society, China Geological Society, 2015.
- [25]王连成. 天津市新近系馆陶组地热流体回灌研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- Wang L C. A study of geothermal reinjection in the Guantao reservoir in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [26]刘久荣. 地热回灌的发展现状[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 100-104.
- Liu J R. The status of geothermal reinjection[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(3): 100-104.
- [27]刘雪玲,朱家玲. 新近系砂岩地热回灌堵塞问题的探讨[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 138-141.
- Liu X L, Zhu J L. A study of clogging in geothermal reinjection wells in the Neogene sandstone aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 138-141.
- [28]林建旺,赵苏民. 天津地区馆陶组热储回灌量衰减原因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 133-136.
- Lin J W, Zhao S M. An analysis of the reinjection attenuation of the Guantao Group geothermal reservoir in the Tianjin Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 133-136.
- [29]李克文,王磊,毛小平,等. 油田伴生地热资源评价与高效开发[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 32-41.
- Li K W, Wang L, Mao X P, et al. Evaluation and efficient development of geothermal resource associated with oilfield[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 32-41.
- [30]宋超凡,赵军,尹洪梅,等. 碳中和背景下油田区地热资源的低成本可持续利用[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 66-73.
- Song C F, Zhao J, Yin H M, et al. Low-cost and sustainable utilization of geothermal resources in oilfields to achieve carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 66-73.
- [31]董秋生,黄贤龙,郎振海,等. 废弃油井改造为地热井技术分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 18-21.
- Dong Q S, Huang X L, Lang Z H, et al. Technical analysis on transforming abandoned oil well into geothermal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(6): 18-21.
- [32]Cheng S W Y, Kurnia J C, Ghoreishi-Madiseh S A, et al. Optimization of geothermal energy extraction from abandoned oil well with a novel well bottom curvature design utilizing Taguchi method[J]. Energy, 2019, 188: 116098.
- [33]朱家玲,汪健生,张伟. 废弃石油井改造为地热井的发展现状[J]. 地热能, 2013(6): 3-6.
- Zhu J L, Wang J S, Zhang W. Development status of transforming abandoned oil well into geothermal well[J]. Geothermal Energy, 2013 (6): 3-6. (in Chinese)
- [34]胡霞,吕建才,张新成. 废弃油井直接换热技术及应用效果评价[J]. 地质与资源, 2020, 29(5): 497-502.
- Hu X, Lyu J C, Zhang X C. Evaluation on application effect of direct heat exchange technology in abandoned oil wells[J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 497-502.
- [35]李霄,王晓光,刘强,等. 大庆石油勘探井改造地热井取得圆满成功[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 102.
- Li X, Wang X G, Liu Q, et al. Successful transformation from oil exploration hole into geothermal well in Daqing area[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 102.
- [36]Rybach L, Hopkirk R. Shallow and deep borehole heat exchangers: Achievements and prospects[C]//Proceedings of World Geothermal Congress. Florence, Italy: International Geothermal Association, 1995.
- [37]Rybach L, Sanner B. Ground source heat pump systems, the European experience[J]. GHC Bull, 2000, 21(1): 16-26.
- [38]Rybach L, Brunner M, Gorhan H. Swiss geothermal update 1995-2000[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress. Kyushu-

- Tohoku, 2000.
- [39] Kohl T, Brenni R, Eugster W. System performance of a deep borehole heat exchanger[J]. *Geothermics*, 2002, 31(6): 687–708.
- [40] 张鹏飞, 王俞舒, 段科峰, 等. 浅析中深层地热埋管供热技术及其工程应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(21): 196–198.
- Zhang P F, Wang Y S, Duan K F, et al. Brief analysis on the heating technology of medium and deep geothermal buried pipe and its engineering application [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(21): 196–198. (in Chinese)
- [41] 邓杰文, 魏庆芃, 张辉, 等. 中深层地热源热泵供暖系统能耗和能效实测分析[J]. *暖通空调*, 2017, 47(8): 150–154.
- Deng J W, Wei Q P, Zhang H, et al. On-site measurement and analysis on energy consumption and energy efficiency ratio of medium-depth geothermal heat pump systems for space heating [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(8): 150–154.
- [42] 李骥, 徐伟, 李建峰, 等. 中深层埋管供热技术综述及工程实测分析[J]. *暖通空调*, 2020, 50(8): 35–39.
- Li J, Xu W, Li J F, et al. Heat supply technology review and engineering measurement analysis of medium and deep buried pipes [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2020, 50(8): 35–39.
- [43] 陕西省住房和城乡建设厅. DBJ 61/T 166–2020 中深层地热埋管供热系统应用技术规程[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- Shaanxi Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. DBJ 61/T 166—2020 Technical regulation for medium deep geothermal buried pipe heating system [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2020.
- [44] 杜甜甜, 满意, 姜国心, 等. 套管式中深层埋管换热器传热建模及取热分析[J]. *可再生能源*, 2020, 38(7): 887–892.
- Du T T, Man Y, Jiang G X, et al. Transfer modeling and heat extraction analysis of coaxial tubes deep borehole heat exchanger[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(7): 887–892.
- [45] 贾林瑞, 崔萍, 方亮, 等. 中深层埋管换热器传热过程对周围岩土体的热影响[J]. *暖通空调*, 2021, 51(1): 101–107.
- Jia L R, Cui P, Fang L, et al. Thermal effect of heat transfer process of deep borehole heat exchangers on surrounding rock and soil [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2021, 51(1): 101–107.
- [46] 刘俊, 蔡皖龙, 王沅浩, 等. 深层地源热泵系统实验研究及管井结构优化[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(9): 2143–2150.
- Liu J, Cai W L, Wang F H, et al. Experimental study and tube structure optimization of deep borehole ground source heat pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(9): 2143–2150.
- [47] Liu J, Wang F H, Cai W L, et al. Numerical investigation on the effects of geological parameters and layered subsurface on the thermal performance of medium-deep borehole heat exchanger[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 384–399.
- [48] 王德敬, 胡松涛, 高志友, 等. 中深层套管式埋管换热器性能的参数分析[J]. *区域供热*, 2018(3): 1–7.
- Wang D J, Hu S T, Gao Z Y, et al. Parameter analysis of the performance of the deep borehole heat exchanger[J]. *District Heating*, 2018(3): 1–7.
- [49] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4741–4752.
- Kong Y L, Chen C F, Shao H B, et al. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4741–4752.
- [50] Song X Z, Wang G S, Shi Y, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system[J]. *Energy*, 2018, 164: 1298–1310.
- [51] Huang Y B, Zhang Y J, Xie Y Y, et al. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 221: 110019.
- [52] 孔彦龙, 黄永辉, 郑天元, 等. 地热能可持续开发利用的数值模拟软件 OpenGeoSys: 原理与应用[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 170–177.
- Kong Y L, Huang Y H, Zheng T Y, et al. Principle and application of OpenGeoSys for geothermal energy sustainable utilization [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 170–177.
- [53] 孔彦龙, 庞忠和, 邵亥冰, 等. 面向成本的中深层地热储群井采灌优化布局研究[J]. *科技促进发展*, 2020, 16(3/4): 316–322.
- Kong Y L, Pang Z H, Shao H B, et al. Cost-oriented optimization on the multi-well layout for geothermal production and reinjection [J]. *Science and Technology for Development*, 2020, 16(3/4): 316–322.
- [54] 余斌, 王沅浩, 颜亮. 钻孔间距和布置形式对埋管管群传热影响的研究[J]. *制冷与空调*, 2010, 10(5): 31–34, 30.
- Yu B, Wang F H, Yan L. Research on influence of space and arrangement between boreholes on the multi-pipe heat exchanger of GSHP [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2010, 10(5): 31–34, 30.
- [55] 孙荟晶, 孙世梅. 热管技术在可再生能源利用中的研究与探索[J]. *现代化工*, 2007, 27(S2): 517–520.
- Sun H J, Sun S M. Utilization and exploration of heat pipe technology for renewable energy source [J]. *Modern Chemical Industry*, 2007, 27(S2): 517–520.
- [56] 李庭樑, 岑继文, 黄文博, 等. 超长重力热管传热性能实验研究[J]. *化工学报*, 2020, 71(3): 997–1008.
- Li T L, Cen J W, Huang W B, et al. Experimental study on heat transfer performance of super long gravity heat pipe [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(3): 997–1008.
- [57] Bu X B, Ma W B, Li H S. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells [J]. *Renewable Energy*, 2012, 41: 80–85.
- [58] 黄文博, 曹文灵, 李庭樑, 等. 干热岩热能重力热管采热系统数值

- 模拟研究与经济性分析[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1302-1313.
- Huang W B, Cao W J, Li T L, et al. Numerical study and economic analysis of gravity heat pipe hot dry rock geothermal system[J]. CIESC Journal, 2021, 72(3): 1302-1313.
- [59] 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 F M, Huang W B, Cao W J. 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.
- [60] Faghri A. Heat pipe science and technology[M]. Columbia: Global Digital Press, 1995.
- [61] Faghri A. Review and advances in heat pipe science and technology[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(12): 123001.
- [62] 黄梦清, 赵树兴, 许康鹿, 等. 地温条件下重力热管蒸发段极限长度研究[J]. 天津城建大学学报, 2021, 27(3): 173-177, 184.
- Huang M Q, Zhao S X, Xu K L, et al. Study on limit length of evaporation section of gravitational heat pipe under the ground temperature condition[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2021, 27(3): 173-177, 184.
- [63] 林红. 某超长重力热管提取地热的模拟及分析[D]. 西安: 西安工程大学, 2016.
- Lin H. The simulation and analysis of an over-length gravity heat pipe's extracting geothermal technology[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2016.
- [64] Kusaba S, Suzuki H, Hirowatari K, et al. Extraction of geothermal energy and electric power generation using a large scale heat pipe[C]//Proceedings of World Geothermal Congress. Kyushu, 2000.
- [65] Vasil'ev L L. Geothermal energy utilization with heat pipes[J]. Journal of Engineering Physics, 1990, 59(3): 1186-1190.
- [66] Mashiko K, Mochizuki M, Watanabe Y, et al. Development of a large scale loop type gravity assisted heat pipe having showering nozzles[C]//Proceedings of 4th International Heat Pipe Symposium. Tsukuba, Japan, 1994.
- [67] Zhang P P, Zhu J L, Chang N N, et al. Experimental study on heat transfer performance of new gravity heat pipe in geothermal utilization[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 5629-5634.
- [68] 杨文斌, 杨峻. SiO₂-乙醇纳米流体重力热管传热性能的试验研究[J]. 当代化工, 2019, 48(12): 2962-2966.
- Yang W B, Yang J. Experimental research on heat transfer performance of SiO₂-ethanol nanofluid gravity heat pipe[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(12): 2962-2966.
- [69] 李锋, 陈娟雯, 岑继文, 等. 表面活性剂对水工质超长重力热管传热性能的影响[J]. 新能源进展, 2021, 9(2): 115-125.
- Li F, Chen J W, Cen J W, et al. Effect of surfactant on heat transfer performance of ultra-long gravity heat pipe with water as working fluid[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2021, 9(2): 115-125.
- [70] 张龙, 吴志湘, 邓保顺. 某超长重力热管提取地热技术的试验分析及改造措施[J]. 节能, 2015, 34(10): 77-80.
- Zhang L, Wu Z X, Deng B S. Experimental analysis and transformation measures of geothermal extraction technology with an ultra-long gravity heat pipe[J]. Energy Conservation, 2015, 34(10): 77-80. (in Chinese)
- [71] 王晓东, 周大可, 刘洪辰, 等. 多级分离式重力热管设计[J]. 科技资讯, 2017, 15(19): 51-52.
- Wang X D, Zhou D K, Liu H C, et al. Design of multistage separated gravity heat pipe[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(19): 51-52.
- [72] 马尔科姆 A 格兰特, 保罗 F 比克斯勒. 热储工程学[M]. 王贵玲, 蔺文静, 译. 北京: 测绘出版社, 2013: 288.
- Grant M A, Bixley P F. Geothermal reservoir engineering[M]. Wang G L, Lin W J, trans. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2013: 288.
- [73] Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report[J]. Geothermics, 2016, 60: 31-43.
- [74] Shortall R, Davidsdottir B, Axelsson G. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 44: 391-406.
- [75] Anderson A, Rezaie B. Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future[J]. Applied Energy, 2019, 248: 18-34.
- [76] 王永真, 杨柳, 张超, 等. 中国地热发电发展现状与面临的挑战[J]. 国际石油经济, 2019, 27(1): 95-100.
- Wang Y Z, Yang L, Zhang C, et al. Status quo and challenges of geothermal power generation in China[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(1): 95-100.
- [77] DiPippo R. Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact[M]. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [78] Zarrouk S J, Moon H. Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review[J]. Geothermics, 2014, 51: 142-153.
- [79] Rubio-Maya C, Díaz V AM, Martínez E P, et al. Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 689-716.
- [80] Powell K M, Rashid K, Ellingwood K, et al. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 215-237.
- [81] Cardemil J M, Cortés F, Díaz A, et al. Thermodynamic evaluation of solar-geothermal hybrid power plants in northern Chile[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 123: 348-361.

- [34]胡新露. 大兴安岭北段-小兴安岭地区斑岩型铜、钼矿床成矿作用与岩浆活动[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015:1-30.
- Hu X L. Mineralization and magmatism of the porphyry Cu, Mo deposits in the northern great Xing'an and Lesser Xing'an Ranges [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015:1-30.
- [35]蔡文艳. 黑龙江省多宝山矿集区铜-钼-金多金属成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020:1-130.
- Cai W Y. Metallogenesis of copper-molybdenum-gold polymetallic in the Duobaoshan orefield, Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020:1-130.
- [36]刘宝山, 张春鹏, 寇林林, 等. 黑龙江争光金矿床方铅矿黄铁矿 Rb-Sr 年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(1): 102-111.
- Liu B S, Zhang C P, Kou L L, et al. Rb-Sr age of galena and pyrite from the Zhengguang gold deposit, Heilongjiang Province and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2022, 46 (1): 102-111.
- [37]刘宝山, 程招勋, 寇林林, 等. 黑龙江多宝山地区晚三叠世岩浆活动对蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的响应[J]. 地学前缘, 2022, 29 (2):132-145.
- Liu B S, Cheng Z X, Kou L L, et al. Late Triassic magmatic activity in Duobaoshan area, Heilongjiang Province: Response to the southward subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(2): 132-145.
- [38]赵忠海. 小兴安岭西北部永新大型金矿成因、成矿地质模式与深部三维成矿预测[D]. 长春: 吉林大学, 2019:1-248.
- Zhao Z H. Ore genesis, metallogenic geological mode and deep metallogenic prediction of the Yongxin large Au deposit based on 3D digital model in the northwestern Lesser Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2019:1-248.

(上接第 425 页/Continued from Page 425)

- [82]Al-Ali M, Dincer I. Energetic and exergetic studies of a multigenerational solar-geothermal system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 16-23.
- [83]朱家玲. 太阳能-地热能混合发电系统优化初探[C]//首届中国太阳能热发电大会论文集. 敦煌: 中国可再生能源学会, 2015.
- Zhu J L. Study on solar-geothermal hybrid power system optimal design [C]//The First China Solar Thermal Power Generation Conference. Dunhuang: China Renewable Energy Society, 2015. (in Chinese)
- [84]谢迎春, 朱家玲, 宋安达, 等. 基于有机朗肯循环的太阳能与地热能耦合的发电系统装置: CN109139157A [P]. 2018-08-17.
- Xie Y C, Zhu J L, Song A D, et al. A power generation system device coupled with solar energy and geothermal energy based on organic Rankine cycle: CN109139157A [P]. 2018 -08 -17. (in Chinese)
- [85]全鸣玉. 基于有机朗肯循环的太阳能地热能联合发电系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Quan M Y. Research on hybrid solar-geothermal power generation system based on organic Rankine cycle [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [86]Gholamian E, Habibollahzade A, Zare V. Development and multi-objective optimization of geothermal-based organic Rankine cycle integrated with thermoelectric generator and proton exchange membrane electrolyzer for power and hydrogen production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 112-125.
- [87]Zare V, Palideh V. Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 418-428.
- [88]Habibollahzade A, Houshfar E, Ashjaee M, et al. Enhanced performance and reduced payback period of a low grade geothermal-based ORC through employing two TEGs [J]. *Energy Equipment and Systems*, 2019, 7(1): 23-39.