

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2期
	学述论文 我国陆区地壳生热率分布与壳幔热流特征研究 王贵玲等 (3) 增强型 CO₂跨临界冷电联产系统性能分析胡开永等 (13) 有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统联产性能研究李太禄等 (17)
	综 述 立足深探浅采借助多能互补高质量发展地热产业 庞忠和 中国科学院地质地球物理研究所 (25) 关于地热开发利用与 Deepseek 的问答 戴传山 天津大学机械学院地热中心 (27) 解锁英国地热能的潜力 陈讲运 编译 (28)
	专 访 更好推进深地资源开发利用——访全国人大代表、中国工程院院士袁亮 中国电力报 (29)
	报 导 山东一地启动供热专项规划修编 潍坊日报 报 (12) 地热供暖面积超千万平米总投资近 30 亿 地热加 App 报 (31) 冰岛与波兰共建绿色能源标杆 地热能资讯 (32)
	(内部资料)

Editor-in-Chief:
Wang Guiling
Editor-in-Chief:
Zhu Jialing
Ma Yan
Zhang Wei
Duty Editor:
Li Man

CONTENTS

No.2 2025

Academic Articles

- Research on the distribution of crustal heat generation rate and characteristics of crustal mantle heat flow in the continental area of China
..... Guiling Wang et al. (3)
- Performance analysis of an enhanced CO₂ transcritical cogeneration system for cooling and power generation
.....Kaiyong Hu et al. (13)
- Research on the cogeneration performance of an organic Rankine cycle coupled with a compression refrigeration cycle
.....Tailu Li et al. (17)

Review Articles

- Based on deep exploration, shallow mining, and utilizing multi energy complementarity to develop high-quality geothermal industry
..... Zhonghe Pang (25)
- Q&A with the DeepSeek on geothermal development and utilization
..... Chuanshan Dai (27)
- Unlock the potential of geothermal energy in the UK
..... Compiled by Jiangyun Chen (28)

Interview

- To better promote the development and utilization of deep land resources – an interview with Liang Yuan, NPC deputy and academician of the CAE
..... China Electric Power News (29)

报 导

- Shandong province launches the revision of the Special Heating Project Planning
..... Weifang Daily (12)
- Geothermal heating covers an area of over 10 million square meters, with a total investment of nearly 3 billion Chinese yuan
..... Geothermal-Plus APP (31)
- Iceland and Poland jointly build a benchmark of green energy
..... Geothermal Energy Information (32)

我国陆区地壳生热率分布与壳幔热流特征研究

王贵玲^{1,3}, 刘峰^{1,2,3*}, 蔺文静^{1,3}, 张薇^{1,3}, 原若溪^{1,3}, 习宇飞^{1,3}, 魏帅超^{1,3}, 廖煜钟^{1,3}, 王亚茹^{4,1}

1 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

2 中国地质大学(北京), 北京 100083

3 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061

4 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘要:壳幔热流配分代表了一个地区的深部热量来源与最基础的地热背景,为区域地热资源的形成提供了重要的约束条件。本文依托CRUST1.0模型与地质资料,将中国陆区在平面上划分为19个构造区,在垂向上将这些区域从第四系沉积物至上地幔的地层划分为8个圈层,确定了这些圈层的分布范围和厚度。在全国范围内实测放射性生热率数据664组,收集地壳放射性生热率及U、Th、K元素含量数据约1000组,系统地完成了上述区域各圈层的放射性生热率填图,统计得出我国陆区上、中、下地壳生热率的平均值分别为 $1.31\mu\text{W}/\text{m}^3$ 、 $0.57\mu\text{W}/\text{m}^3$ 与 $0.22\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。在此基础上,结合最新的全国大地热流测量数据(1503组)完成了我国陆区地壳-地幔热流分布的研究。研究表明,我国陆区 $q_c/q_m > 1$ 的面积占80.1%、 $q_c/q_m > 1.2$ 的面积占65.8%。除我国东部、中部的一些盆地之外,在我国陆区大部分地区,地壳均为大地热流的最主要热源。地壳各圈层中,基底层至中地壳为地壳的主要的产热区域,贡献了平均约50%的大地热流值。本文以面积加权计算得我国陆区地壳热流平均值为 $39.1\text{ mW}/\text{m}^2$,其中青藏高原最高、东南沿海次之,两者分别得益于较大的地壳厚度与较高的基岩地层生热率。我国陆区地幔热流平均值为 $29.7\text{ mW}/\text{m}^2$,与全球地幔热流平均值接近,其中东部沿海地区、环鄂尔多斯地区、藏滇地热带分布区较高。地壳热流、地幔热流的高值区与我国的主要地热资源分布区均具有较好的一致性。

关键词:大地热流;生热率;岩石圈热结构;地幔热流;中国大陆地壳

引言

大地热流(q_0)作为表征地球内部热动力过程和壳幔生热能力的综合参数,可分为由地壳各岩层放射性产热所产生的地壳热流 q_c 与通过上地幔向上传导的地幔热流 q_m (Roy et al., 1968; Furlong and Chapman, 1987)。一个地区壳幔热流值的高低、 q_c/q_m 的比值以及 q_c 的具体组成,共同构成了壳幔热结构研究的最基本概念,代表了一个地区的深部热量来源与最基础的地热背景(Lachenbruch, 1970; 王贵玲等, 2020)。

我国以往的壳幔热流配分、岩石圈热结构等

研究多局限于某一盆地或小区域中,如共和盆地(Lin et al., 2021)、渭河盆地(饶松等, 2016)、贵德盆地(Liu et al., 2017)、苏鲁地体(吴耀等, 2005)等。较大区域的研究多集中于资料相对丰富的我国东部地区(何丽娟等, 2001),如华北地台(迟清华和鄢明才, 1998)、华南地区(张健等, 2018; Lin et al., 2022)等。同时,由于缺乏实测数据,上述热结构研究所用的深部地壳生热率参数大多为通过Vp-A经验公式获得。此类公式均为根据欧洲部分区域样品推导得出(Lachenbruch, 1970),且越来越多的研究(赵平, 1995; 汪

洋, 2006; 赵平等, 2015)表明, 该经验公式缺乏可靠的数学联系, 在我国陆区的适用性存疑, 从而影响了各区域岩石圈热结构计算结果的可信度。李廷栋等(2013)、陈超强等(2022)先后开展了全国尺度岩石圈热结构的初步研究, 但也存在“①所用大地热流数据(507组、1023组)相对较少, ②浅部生热率计算分区、分层较为粗略(论文中分别将中国分为1个、6个分区), ③缺乏深部地壳实测生热率数据”等问题, 研究程度有待进一步提高。

因此, 本文依托CRUST1.0模型(Laske et al., 2013)与我国陆区地表岩性分布图(Steinshouer et al., 1999)建立了我国陆区地壳结构模型, 结合全国范围内岩石生热率测试、地壳元素数据相关文献整理与分析等工作得到了中国陆区不同构造分区沉积层、基岩、上地壳、中地壳、下地壳的放射性生热率参数。在此基础上, 利用最新的全国大地热流测量数据完成了我国陆区壳幔热流分布的研究, 主要方法与工作成果如下文所述。

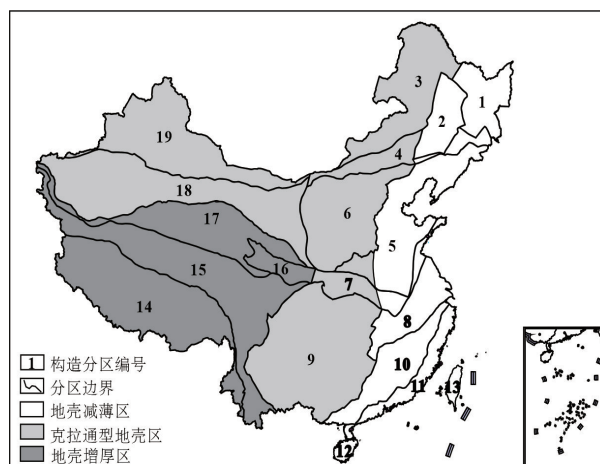
1 地热地质背景

1.1 区域构造背景

如图1所示, 我国陆区自东部沿海地区向西南青藏高原地区可大概分为三类岩石圈, 即东部地壳减薄区、中西部克拉通型地壳区、青藏高原地壳增厚区(滕吉文等, 2004; 蔡学林等, 2007; Guo et al., 2019), 不同类型的岩石圈厚度、主要岩性、密度等均有差异。李廷栋等(2013)在此基础上, 将我国陆区分为15个地壳构造区, 将单个构造区作为一个整体查明了区内上、中、下地壳的主要岩性并分别计算了各层的地震纵波、横波速度(V_p 、 V_s)、密度(ρ)等参数。

本文将上述15个地壳构造区与《中国大地构造图》(潘桂堂和肖庆辉, 2015)结合, 将我国陆区进一步细分为19个岩石圈构造区(图1)。由于各分区内部具有一致的地壳结构和相似的地壳物质组成, 可以将这些分区作为地壳不同圈层生热率的计算分区。取在同一计算分区内同一岩层获取的放射性生热率数据的平均值, 作为该分区内该岩层的生热率。为方便计算, 部分地壳

构造区地跨两类岩石圈区域的, 以面积加权方法计算以上参数。



1-兴安地块, 2-兴凯地块, 3-松辽盆地地块, 4-额尔齐斯—西拉木伦对接带, 5-环鄂尔多斯构造带, 6-上扬子陆块, 7-华北陆块东部, 8-秦祁昆构造带东段, 9-下扬子陆块, 10-南岭地块, 11-东南沿海岩浆弧, 12-海南弧盆地, 13-台湾弧盆地, 14-青藏高原南部地块, 15-北羌塘—三江造山带, 16-秦祁昆构造带中段, 17-秦祁昆构造带西段, 18-塔里木陆块, 19-天山—准噶尔—北山造山系

图1 我国陆区地壳类型与生热率计算分区示意图

1.2 大地热流背景

截至目前, 本文收录我国陆区大地热流测点共1670组。其中, 我国陆区第四次热流数据汇编数据共1230组(姜光政等, 2016), 本文收集已发表未汇编热流数据180组(Davies and Davies, 2010; 李春荣等, 2017; Gao et al., 2018; 雷晓东等, 2018; 张超等, 2018; 金春爽等, 2019; Liu et al., 2020; Wang et al., 2020b; Zhang =, 2020; Wei et al., 2022)。2019–2021年, 由中国地质调查局组织, 多家单位参与的“全国大地热流值测量与靶区优选”项目共新增实测热流测数据260组。上述数据分布如图2所示, 数据总量较第四次汇编增加35.8%, 高质量的A、B类数据占比由83.5%提升至86.3%, 在测点密度、数据质量、覆盖范围等方面均有较大提升, 可为我国陆区壳幔热结构研究提供数据支撑。

结合前人研究(何丽娟等, 2001; 汪洋等, 2001; 李廷栋等, 2013)中对热流数据的分析整理

方法,对现有热流值进行统计分析,剔除部分异常点、低质量点,可进一步提高大地热流数据的有效性。(1)首先剔除所有D类数据及部分与周边热流值相差较大、存在明显异常的C类数据,只保留高质量热流数据参与统计。(2)国内外壳幔热流研究成果(Pollack et al., 1993; 赵平, 1995)显示,我国陆区地幔热流范围约为10–45 mW/m²,平均值约30 mW/m²。因此,为减少边界效应与剔除明显受冷水影响而数值较低的热流点,所有小于40 mW/m²的热流数据本次都不纳入计算。(3)大于150 mW/m²的高热流异常值一般都受垂向水热活动影响,无法代表区域传导型地热背景。因此,本文参照李廷栋等(2013)所用的数据处理方法,将此类数据也剔除计算。

综上,如图2所示共筛选出质量较高的大地热流数据1503组(占总数据量的87%),以此为地表热流值(q_0)开展壳幔热结构研究。



图2 全国陆区大地热流测点分布示意图

2 数据和方法

2.1 地壳结构分层

本文利用CRUST1.0全球地壳模型(Laske et al., 2013)中的数据为基础,以73°E–136°E、2°N–54°N为边界,完成我国陆区地壳分区、分层工作。CRUST1.0系列地壳模型基于大量地学断面、地震波速测量剖面等数据建立,自CRUST5.1(Mooney et al., 1998)开始,历经数次更新,目前

的平面上的数据精度为1°×1°。在垂向上则分为9层,每一层给出了厚度、 V_p 、 V_s 及 ρ 等参数。这9层分别为水层,冰层,上、中、下沉积层,上、中、下地壳与上地幔。各圈层赋予相应的生热率参数,即可获得区域地球化学模型。作为一个成熟的深部岩层结构模型,CRUST5.1、CRUST1.0被很多学者应用于岩石圈特征(Baranov et al., 2001; Chen, 2017)及岩石圈热结构(Artemieva, 2003)的研究中。

2.2 各区域、各圈层岩石放射性生热率计算

浅部几公里内的岩石,生热率主要通过测试岩体的铀、钍、钾丰度与密度,代入岩石放射性生热率计算公式(Rybach, 1976)获取,单位为 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。深部地壳的岩石样品因难以获取,前人研究中多采用地震波速 V_p 与放射性生热率的经验公式进行估计(Rybach & Buntebarth, 1984),但该方法在我国的适用性目前饱受质疑(赵平, 1995)。因此,本文在全国范围内大量采集了不同岩性、不同地质年代的岩样并进行生热率测试。尤其对数千米乃至万米的深钻岩心、出露深源包裹体及深部地质断面开展重点取样,样品数量及所处地层如表2所示。同时,为弥补本次工作测试样品的不足,本文收集整理了近几十年来国内外学者在我国地壳深部岩石放射性元素丰度、放射性生热率方面的研究成果(表2),从中提取获取了丰富的地壳岩层铀、钍、钾元素丰度实测数据,结合由CRUST1.0模型中不同地壳圈层的密度数据,可获得不同构造分区的大量上、中、下地壳放射性生热率参数,为我国陆区不同构造分区壳幔热结构的计算提供基础数据。

2.3 壳幔热流配分计算

根据定义,大地热流 q_0 是地表至地心所有岩层向上传导热量叠加的综合显示。而在地壳及上地幔范围内,传导热量基本都是由放射性元素的衰变产生的(Mao et al., 2019; Liu et al., 2017)。因此,可以利用“剥层”的方法计算地壳各圈层的热流贡献及壳幔热流比,即为壳幔热结构,公式如下:

$$q_i = D_i \cdot A_i \quad (1)$$

$$q_0 = \sum q_i \quad (2)$$

其中, q_i 为地表以下某一圈层的放射性衰变所产生的热流值(单位: mW/m^2), 为该层的厚度 D_i (单位: km) 与该层平均生热率 A_i (单位: $\mu\text{W/m}^3$) 的乘积。地表大地热流 q_0 是所有圈层热流值 q_i 的集合。由于上地幔以下岩层放射性生热率较低, 一般“剥层”至莫霍面, 则莫霍面以上所有地层放射性生热所产生的热流即为地壳热流 q_c ; $q_0 - q_c$ 产生的剩余热流即为地幔热流 q_m , 也就是地幔以下岩层向上传导的热流值。

3 地壳结构划分

CRUST1.0 模型中上、中、下地壳与地幔之间边界明确, 但未单独划分上地壳之上的基岩层。基岩层以上的沉积层也仅划分为上、中、下沉积层(合称沉积层), 其与实际地层的对应关系需结合实际情况具体确定, 以便与各区域实测、收集的放射性生热率数据结合, 开展模型各岩层的生热率参数赋值。

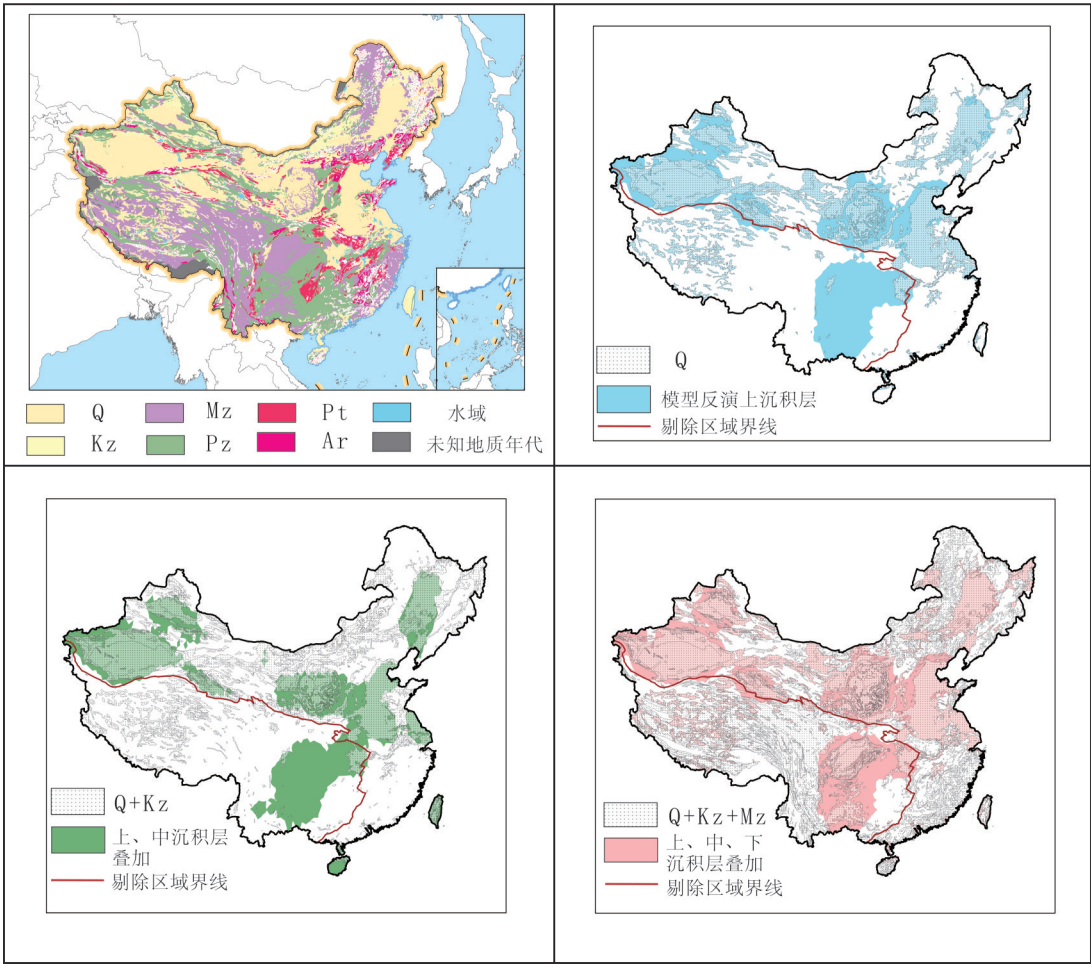
主要基于 V_p (地震纵波速度) 的不同划分各地壳圈层 (Bagherbandi et al., 2015; Gedamu et al., 2020)。该方法对于 V_p 变化特征明显的深部圈层(上、中、下地壳与地幔)区分效果较好。但是浅部的上、中、下沉积层(合称沉积层)之间的边界与地层岩性、沉积年代等地质条件的关系并不明确, 需结合实际情况具体划分, 从而确定各区域实测、收集的放射性生热率数据应赋值的具具体层位。

基于我国陆区地表岩层资料(潘桂堂和肖庆辉, 2015; Steinshouer et al., 1999), 简化后的中国陆区出露岩层的地质年代分布如图 3(a) 所示, 将我国地壳结构模型中上、中、下沉积层地层的范围与图 3(a) 中不同地质年代地层的范围进行对比分析可得: 除青藏高原与上扬子陆块之外, 第四系地层的分布区域与 CRUST1.0 模型中上沉积层分布区有明显的对应关系。在此基础上, 本文将太古界至第四系的地层逐一与 CRUST1.0 模型中的上、中、下沉积层分布范围进行对比拟合, 可得图 3(a) 中的第四系地层(Q)、新生界地层(Kz)、

中生界地层(Mz)与地壳模型中的上、中、下沉积层有较好的对应关系, 即第四系松散沉积层与上沉积层面积接近, 分布范围高度重合。中生界之后沉积的地层(Q+Kz)与中、上沉积层, 古生界之后沉积的地层(Q+Kz+Mz)与沉积层总体之间也存在上述关系。按模型中沉积层厚度 $\geq 400\text{m}$ 为边界计算, 在全国范围内, 上述对应各层位的分布面积相差不高于 10%, 分布范围重合率均高于 50% (图 3)。剔除模型反演沉积层分布与实际明显不符的青藏高原地区(图 1 中的 14-17 分区)与上扬子陆块(图 1 中的 9 号分区)后, 如图 3(b,c,d) 所示, 上述地层与对应反演沉积层的面积比分别为 107.8%、103.4% 和 121.7%, 分布范围重合率也分别达到了 69.43%、69.03%、75.01%, 相关性较好。

由于 CRUST1.0 模型中各沉积层的边界主要基于各地层不同的地震波速(V_p 、 V_s)划分, 与密度变化相关性最高(Laske et al., 2013; Gedamu et al., 2020)。从密度上看, 太古界至第四系的岩层中, 第四系主要岩性为松散沉积物与火山岩, 孔隙度最大, 密度最小; 新生界岩性主要为固结-半固结沉积岩, 密度略大; 中生界基本以沉积岩与变质岩为主, 密度相对较大。这一特征与本文地壳模型中的上、中、下沉积层有较好的对应关系。前中生界岩层与侵入岩层一般孔隙度较小, 与上地壳片岩、片麻岩、花岗质岩层密度相近, 地震波速均较高。因此 CRUST1.0 中根据密度、地震波速将前中生界岩层与侵入岩层均划入上地壳也是合理的。

综上, 考虑到 CRUST1.0 模型的精度仅为 $1^\circ \times 1^\circ$, 且地层的密度、 V_p 也在一定程度上受其他因素影响, 与其形成的地质年代并不完全一致, 因此本文认为图 3 显示的 70% 左右的分布范围重合率可为古生界后的沉积地层与模型中沉积层的对应关系提供足够的证据。青藏高原、上扬子陆块中实际地层与模型沉积层的不一致可能是由于这些区域内地壳增厚(Chen, 2017)或挤压运动(蔡学林等, 2007)造成区域地震波速、密度异常, 从而使得模型中反演的浅部沉积层划分出现较大误差。



Q:第四系松散沉积物,Kz:新生界地层(不含第四系地层),Mz:中生界地层,Pz:古生界地层,Pt:元古界地层,Ar:太古界地层

图3 我国陆区出露岩层地质年代与地壳模型沉积层分布对比图

基于以上分析,以表1作为划分原则对于上地壳以上的岩层进行划分。其中,前中生界地层与侵入岩层与上地壳在密度、 V_p 方面均比较接近,但生热率却与上地壳存在明显差异(汪集旻和汪缉安, 1986),因此将其作为上地壳与沉积层之间的

基底岩层。由于该基层与上地壳之间无明确的边界,结合前人在华北(嘉世旭等, 2009; Wang et al., 2020a)、华南(旷健等, 2020)、青藏高原(张超等, 2018)的研究成果,取经验值 5km 作为该层厚度,划分基底层与上地壳之间的边界。

表 1 CRUST1.0 模型结构层与实际地层对照表

序号	实际地层	CRUST1.0模型中的圈层	与上覆层位的边界
1	第四系岩层	上沉积层	水层、空气层底边界(上沉积层顶)
2	新生界岩层	中沉积层	上沉积层底(中沉积层顶)
3	中生界岩层	下沉积层	中沉积层底(下沉积层顶)
4	前中生界岩层与侵入岩	基底层(上地壳上部5km)	下沉积层底(上地壳顶)
5	上地壳	上地壳	假定为下沉积层底之下 5km
6	中地壳	中地壳	上地壳底(中地壳顶)
7	下地壳	下地壳	中地壳底(下地壳顶)
8	上地幔	上地幔	莫霍面

4 各区域、各圈层生热率数据填图

基于以上成果,可将我国陆区地幔上部岩层概化为19个平面分区(A_1 – A_{19})、8个垂向分层(L_1 – L_8)的地质模型。对于其中每个分区的每个层段(A_iL_k),可综合该区域该岩层内实测与收集的生热率数据,取平均值作为模型中 A_iL_k 空间的生热率(表2)。其中, L_1 – L_4 岩层的生热率可通过在相应地质年代地层的分布区直接取样并测试。

我国陆区上地壳主要由片麻岩、花岗闪长岩、变粒岩、片岩、片麻岩等组成,相关岩体在地表多有出露,一般被归类为古太古代变质岩层。对于上地壳岩体,一般参考该各区域的上地壳主要岩性(邱瑞照等, 2006),选取区域内相同岩性的太古代地层进行取样、测试,获得该区域上地壳生热率数据。

中、下地壳埋深达十几甚至几十公里,岩样难

以获取,但是可以通过获取出露地表的中、下地壳岩体捕虏体或地质剖面内的岩样近似替代(赵平, 1995; 汪洋, 2005)。其中,中地壳岩性主要为角闪岩、闪长岩、片麻岩;下地壳岩性主要为麻粒岩与辉长岩;在青藏高原的地壳加厚区,下地壳还存在榴辉岩层(邱瑞照等, 2006)。对于无法实测或收集到生热率数据的岩层,通过收集资料获得深源捕虏体中的U、Th、K物质含量,结合CRUST1.0模型中该区域该地层的密度数据,通过公式(1)也可推算出其放射性生热率。

综上,本文实测生热率数据664组,收集生热率数据约1000组,完成了中国陆区地表至上地幔不同层位岩石放射性生热率的初步填图工作。各构造分区各岩层平均放射性生热率数据及参考文献如表2所示。

表2 我国陆区地壳各圈层生热率计算成果及数据来源一览表

序号	分区名称	所在区域	生热率($\mu W/m^3$)																				
			第四系松散沉积物	数据量	数据来源	新生界地层	数据量	数据来源	中生界地层	数据量	数据来源	前中生界及侵入岩体	数据量	数据来源	上地壳	数据量	数据来源	中地壳	数据量	数据来源	下地壳	数据量	数据来源
1	兴安地块	东北地区	0.75	14	本次实测	1.14	26	本次实测	2.97	93	姜光政, 2017	1.57	64	姜光政, 2017	1.20	/	姜光政, 2017	0.60	/	姜光政, 2017	0.30	/	姜光政, 2017
2	兴凯地块	东北地区	0.75			1.14			1.64	53		2.89	3		1.50	/		0.70	/		0.40	/	
3	松辽盆地地块	东北地区	0.75			1.14			2.12	7		1.63	/		1.40	/		0.60	/		0.30	/	
4	额尔齐斯—西拉木伦对接带	东北地区	0.72	3	本次实测	1.59	32	本次实测	2.80	14	本次实测	2.72	12	本次实测	1.52	4	本次实测	0.97	2	本次实测	0.27	3	本次实测
5	鄂尔多斯陆块及周边	中部地区	1.33	31	饶松等, 2016	1.49	81	孙少华等, 1996	1.50	18	孙少华等, 1996	1.72	73	孙少华等, 1996	1.01	/	鄢明才和迟清华, 1997	0.38	/	林宇, 2010	0.26	5	陈海东等, 2014
6	上扬子陆块	中部地区	1.43	2	本次实测	1.82	14 (9+5)	徐青等, 1992; 本次实测	1.60	16 (12+4)	徐青等, 1992; 本次实测	2.05	29 (27+2)	徐青等, 1992; 本次实测	1.26	8	郭晋威, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.17	10	黄小龙和徐义刚, 2002.
7	华北陆块东部	华北地区	1.02	/	鄢明才和迟清华, 1997	1.43	32	龚育龄, 2003	1.39	134	本次实测	1.60	36	本次实测	0.91	/	鄢明才和迟清华, 1997	0.55	7	张伟强等, 2022	0.33	34	银雪琴, 2016; 刘平华等, 2012; Liu et al., 2001
8	秦祁昆构造带东段	华北-扬子接触带	0.86	/	鄢明才和迟清华, 1997	2.38	7	王良书和施央申, 1989	2.14	7	王良书和施央申, 1989	1.96	10	王良书和施央申, 1989	1.10	/	He et al., 2009	0.83	/	He et al., 2009	0.37	/	He et al., 2009
9	下扬子陆块	长江中下游地区	1.02	/	鄢明才和迟清华, 1997	2.38	7	王良书和施央申, 1989	2.14	7	王良书和施央申, 1989	1.96	10	王良书和施央申, 1989	1.26	8	郭晋威, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.17	10	黄小龙和徐义刚, 2002.
10	南岭地块	东南山区	/			/			/			5.18	18	林乐夫等, 2017	1.88	/	赵梦磊, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.09	10	于津海等, 2002
11	东南沿海岩浆弧	东南沿海地区	/			/			/			3.01	21	林乐夫等, 2017	1.67	/	赵梦磊, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.09	10	于津海等, 2002

续表

12	海南弧 盆地	东南沿 海地区	/		/		/			2.85	8	本次实 测	1.67	/	赵梦磊, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.09	10	于津海 等,2002		
13	台湾弧 盆地	东南沿 海地区	/		/		/			3.01	21	林乐夫 等,2017	1.67	/	赵梦磊, 2021	0.60	5	李湿江, 2020	0.09	10	于津海 等,2002		
14	青藏高 原南部 地块	青藏 高原	0.90	1	本次 实测	1.23	19	本次 实测	2.39	19	本次 实测	2.39	49	沈显杰 等,1989	1.57	10	张藤藤, 2020	0.43	6	于涛等, 2021	0.27	20	刘文中, 2006;王 巍等, 2021
15	北羌塘 -三江 造山带	青藏 高原	0.90	2	本次 实测	2.20	45	本次 实测	2.12	49	本次 实测	2.33	40	本次 实测	1.57	10	张藤藤, 2020	0.72	23	郑玉文, 2020;彭 智敏等, 2021;谭 洪旗和 刘玉平, 2017	0.27	20	刘文中, 2006;王 巍等, 2021
16	秦折昆 构造带 中段	青藏 高原	0.90	2	本次 实测	3.80	20	本次 实测	3.96	40	本次 实测	4.03	37	本次 实测	0.94	3	邱楠生, 2002	0.38	8	孟繁聪 等,2004	0.16	13	孙慧, 2020;李 怀坤等, 2006;国 显正等, 2018
17	秦折昆 构造带 西段	青藏高 原	2.21	18	邱楠生, 2002	2.21	70	邱楠生, 2002	1.62	14	邱楠生, 2002	0.72	3	邱楠生, 2002	0.94	3	邱楠生, 2002	0.38	8	孟繁聪 等,2004	0.16	13	孙慧, 2020;李 怀坤等, 2006;国 显正等, 2018
18	塔里木 陆块	西北地 区	1.28	11	本次 实测	1.18	8	本次 实测	1.16	24	邱楠生, 2002	1.06	13	邱楠生, 2002	0.95	3	Guo et al.,2005	0.38	/	林宇, 2010	0.18	24	郑建平 等,2005; 陈希节 等,2012;
19	天山- 准噶尔 -北山 造山系	西北地 区	1.28	11	本次 实测	1.18	8	本次 实测	0.85	2	邱楠生, 2002	1.31	13	邱楠生, 2002	0.95	3	Guo et al.,2005	0.38	/	林宇, 2010	0.18	24	郑建平 等,2005; 陈希节 等,2012
全国陆区			平均值	1.08	数据 总量 84 (49+35)	1.75	364 (199+ 165)	2.03	490 (230+ 260)	2.30	数据 总量	489 (294+ 195)	1.31	数据 总量	28 (24+4)	0.57	数据 总量	51 (49+2)	0.22	数据 总量	119 (116+3)		
			最大值	2.21		3.80		3.96		5.18		1.88	0.97		0.40								
			最小值	0.72		1.14		0.85		0.72		0.91	0.38		0.09								

注:①/代表源文献未明确列出数据量;②斜体为该构造区域无相应层位生热率数据,利用周边其他构造区域数据代替。③各层位数据总量为目前可统计的数据量。由于部分文献未明确说明数据量,本文实际应用的数据量远大于统计值。

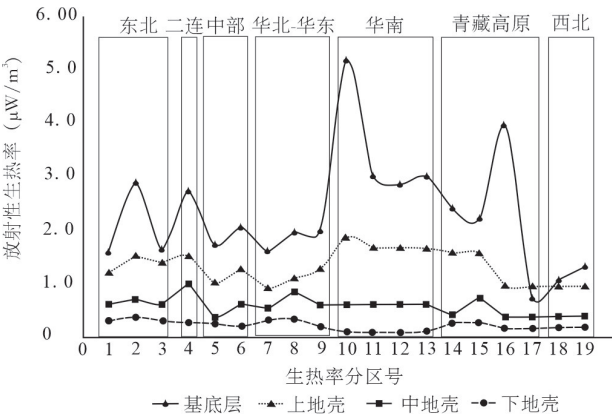


图4 我国陆区沉积层以下地层生热率统计示意图

各构造区的生热率数据统计结果如图4所示,一般基底层以下的地层,随着深度增加生热率值都逐渐变低,符合地壳放射性元素向地表富集的理论趋势(龚育龄, 2003)。中生界以上岩层生热率则变化幅度较大,规律性较差,故未在图4中显示。其中,华南地区基底层、上地壳生热率最高,下地壳生热率则最低,推测为该区域地壳活动剧烈,加剧了放射性物质向地表的富集。

序号为3、5、7、9、17、18、19的几块区域分别发育了松辽盆地、华北平原、鄂尔多斯盆地、苏北盆地、柴达木盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地,为我国主要盆地分布区。与周边的山区相比,这些地区

的基底生热率相对较低。这可能是这些区域的基底层主要由前中生界沉积岩、变质岩组成,而其他地区基底层中含有大量花岗岩类侵入岩造成的。山区的侵入岩放射性生热率一般大于 2.5 W/m^3 (赵梦磊, 2021), 高于一般的沉积岩与变质岩。一些地区的花岗类侵入岩放射性生热率甚至高达 5 W/m^3 以上, 一般称之为高产热花岗岩。

我国的高产热花岗岩主要分布于东南沿海地区和青藏高原, 这些区域也是基底层放射性生热率最高的地区(图4)。这些地区的大地热流值也都相对较高(图2), 说明基底层的产热是大地热流的一项重要热源。

如表2所示, 我国陆区上、中、下地壳生热率平均值分别为 $1.31 \mu\text{W/m}^3$ 、 $0.57 \mu\text{W/m}^3$ 、与 $0.22 \mu\text{W/m}^3$ 。前人在我国陆区及我国陆区东部的上、中、下地壳生热率取值分别为 $1.3 \mu\text{W/m}^3$ 、 $0.4 \mu\text{W/m}^3$ 、 $0.2 \mu\text{W/m}^3$ (李廷栋等, 2013; 汪洋, 2005)。两者非常接近, 说明本文中生热率数据的选取较为合理。

5 壳幔热流配分

将所筛选出的1503个大地热流值测点(图2)的坐标代入CRUST1.0模型, 即可得到这些点在垂向上各岩层的埋深、厚度、 V_p 、密度等参数。结合公式2、公式3, 以地表为起算点, 通过“剥层法”对每一层逐一进行计算, 即可获得各点地表至上地幔不同岩层的热流贡献(q_i)、源自地壳的热流值(q_c)、源自地幔的热流值(q_m)及壳幔热流比值(q_c/q_m)。

5.1 壳幔热流配分

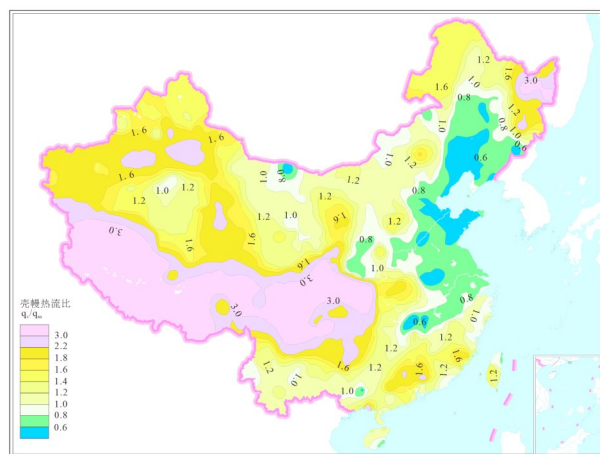


图5 我国陆区 q_c/q_m 等值线图

我国陆区壳幔热流比值分布如图5所示, 其中 $q_c/q_m > 1$ 的面积占 80.1%、 $q_c/q_m > 1.2$ 的面积占 65.8%, 说明除华北地区、东北地区、长江中下游地区及中部的一些盆地之外, 地壳均为我国陆区大地热流的最主要热源。

考虑到大地热流值测量与生热率计算均存在一定误差, $0.8 \leq q_c/q_m \leq 1.2$ 的区域壳源热流与幔源热流相差不大, 可近似称为“壳-幔热源平衡区”。 $q_c/q_m < 0.8$ 的区域大地热流明显以幔源产热为主, 可以划分为“幔源产热区”; $q_c/q_m > 1.2$ 的区域大地热流明显以壳源产热为主, 可以划分为“壳源产热区”。如图5所示, 我国东部平原区及胶东半岛、辽东半岛均为“幔源产热区”。青藏高原、西北地区、上扬子陆块等区域为“壳源产热区”。除此之外的其他区域壳幔产热比例接近, 可以划分为“壳幔热源平衡区”。

5.2 不同圈层的产热能力

我国陆区不同构造分区的面积占比、各分区地壳各圈层的热流贡献等数据成果如表3所示。鉴于热流测点的分布并不均匀, 东部地区较多, 西南、西北地区较少, 因此面积加权平均值代表性更好。经面积加权得: 我国陆区 q_c/q_m 平均为 1.8, 总体而言地壳岩层的放射性产热是我国陆区大地热流的主要热源。其中基底层至中地壳为最主要的产热区域, 贡献了约 50% 的大地热流值。沉积层、下地壳的热流平均贡献率均小于 5%。在盆地分布区沉积层的热流贡献率约 5–11%, 是非常重要的热量来源; 而部分以山地为主的区域沉积层较薄, 其热流贡献可以忽略。山区的基岩一般生热率较高, 基底层热流贡献相对较高, 热流贡献率最高可达约 35%。以上成果表明本文对于不同沉积层及基底层分布范围、沉积年代、厚度等参数的界定是有非常有必要的。

我国陆区地壳热流平均值约 39.1 mW/m^2 , 壳源热流的分布基本呈西高东低, 南高北低的趋势。其中青藏高原壳源热流值最高, 约 $55\text{--}75 \text{ mW/m}^2$, 主要与该区域地壳厚度较大(普遍高于 50 km)有关。东南沿海地区次之, 主要是由该区域较高的基底岩层放射性生热率(普遍大于 $2.5 \mu\text{W/m}^3$)引起的。这两个区域也是我国陆区中高温对流型地热

资源最丰富的地区,说明较高的壳源热流是中高温对流型地热资源的存在的一大控制因素。我国陆区地幔热流平均值约 29.7 mW/m^2 ,其中东部沿海地区、藏滇地热带、环鄂尔多斯盆地区域较高,与这些区域地热显示较多的现象也具有较好的一

致性,说明地幔热流对地热资源、尤其是传导型地热资源的产生具有一定的促进作用。中西部其他地区地幔热流普遍较低,地热显示也较少,与前人研究成果相近(邱楠生等, 2019)。

表3 我国陆区地幔及地壳各圈层热流贡献统计表

分区编号	面积占比	热流点数量	平均值(mW/m^2)		q_c/q_m 平均值	各圈层的平均热流贡献比例					
			q_c	q_m		沉积层	基底层	上地壳	中地壳	下地壳	地幔
1	2.9%	12	35.98	19.97	2.3	0.6%	26.5%	16.8%	14.5%	7.6%	34.0%
2	2.3%	45	26.10	41.93	0.7	4.7%	12.6%	9.4%	9.4%	4.2%	59.7%
3	6.1%	61	34.33	30.27	1.4	0.9%	12.9%	23.8%	14.6%	3.1%	44.6%
4	2.5%	20	41.81	32.07	1.6	0.4%	14.6%	22.7%	14.8%	5.5%	42.0%
5	6.7%	352	23.82	40.52	0.7	2.7%	11.1%	9.0%	10.5%	5.3%	61.4%
6	6.8%	161	31.86	34.02	1.1	5.4%	13.5%	19.7%	8.7%	2.5%	50.1%
7	2.3%	46	31.36	29.31	1.3	2.8%	16.7%	11.6%	16.5%	6.0%	46.5%
8	3.0%	169	25.69	41.35	0.7	1.0%	15.2%	11.2%	9.8%	2.7%	60.2%
9	12.4%	162	38.46	24.38	2.3	10.9%	17.0%	19.3%	14.0%	2.3%	36.6%
10	3.9%	85	44.14	31.93	1.6	0.2%	34.7%	14.6%	8.6%	1.3%	40.6%
11	2.0%	48	31.43	35.52	1.1	1.8%	23.3%	13.0%	9.7%	1.4%	50.8%
12	0.4%	11	30.21	31.56	1.1	4.7%	14.2%	20.4%	9.5%	1.5%	49.8%
13	0.4%	56	36.11	40.86	1.1	6.3%	20.5%	13.7%	7.2%	1.5%	50.7%
14	10.8%	25	61.60	32.24	3.6	0.0%	16.2%	38.7%	7.4%	4.1%	33.6%
15	10.7%	10	60.02	32.11	2.5	0.2%	11.5%	36.6%	14.0%	3.3%	34.3%
16	1.3%	31	51.45	33.30	2.1	0.4%	20.9%	26.6%	12.5%	2.7%	36.9%
17	6.3%	82	34.79	26.04	1.5	7.3%	6.0%	33.1%	8.7%	3.4%	41.5%
18	11.2%	88	30.83	23.65	1.6	9.1%	12.3%	22.7%	11.7%	3.1%	41.1%
19	8.1%	39	29.26	21.14	1.7	6.7%	10.8%	27.3%	13.1%	2.5%	39.5%
全国陆区面积加权平均值			39.1	29.7	1.8	4.3%	14.6%	23.9%	11.6%	3.4%	42.2%

6 结论

1. 综合分析 CRUST1.0 模型与我国陆区地表岩体分布,确定了模型中地震波反演沉积层与第四系、新生界、中生界地层的对应关系,建立了包含中国陆区第四系松散层、新生界沉积层、中生界沉积层、基底层、上-中-下地壳及上地幔等地质圈层的分布范围、厚度、密度等参数的中国陆区三维地壳结构模型。同时,结合前人成果将我国陆区划分为 19 个构造分区,每个分区内岩层分布、地壳结构基本一致,可以将区内的单个圈层作为一个整体开展热物性参数赋值。

2. 在全国范围内实测放射性生热率数据 664 组,收集放射性生热率及地壳 U、Th、K 元素含量数

据约 1000 组,基于我国陆区地壳结构模型在平面上、垂向上的分区与分层系统地完成了各构造区各地质圈层的放射性生热率填图。数据表明:总体而言,我国陆区沉积层生热率变化规律性较差,而基底层以下随着深度增加生热率降低的趋势较为明显。其中,华南地区基底层、上地壳生热率最高,下地壳生热率则最低,推测为该区域地壳活动剧烈,放射性物质向地表富集程度较高所致。基于统计数据得我国陆区上、中、下地壳生热率平均值分别为 $1.31 \mu\text{W/m}^3$ 、 $0.57 \mu\text{W/m}^3$ 与 $0.22 \mu\text{W/m}^3$,与前人研究成果接近,说明本文中生热率数据的选取较为合理。

3. 对我国陆区现有大地热流值测量数据进行

了筛选,共获得质量较高的1503组大地热流数据,结合我国陆区地壳结构与生热率参数分布数据完成了我国陆区地壳-地幔热流分布的研究。分别以 $q_c/q_m < 0.8$, $0.8-1.2$, > 1.2 为界,划分了我国陆区大地热流的“幔源产热区”、“壳幔热源平衡区”、“壳源产热区”。研究结果表明我国陆区 $q_c/q_m > 1$ 的面积占80.1%,其中“壳源产热区”的面积占65.8%。除华北地区、东北地区、长江中下游地区及中部的一些盆地之外,在我国陆区大部分地区,地壳均为大地热流的最主要热源。

4.地壳各圈层中,基底层至中地壳为地壳的主要的产热区域,贡献了约50%的大地热流值。盆地分布区沉积层热流贡献率约5-11%,是重要的产热地层。基底层厚度不大,但生热率相对较高(约6-35%),热流贡献不可忽略。我国陆区地壳热流平均值约39.1 mW/m²,青藏高原与东南沿海地区最高;地幔热流平均值约29.7 mW/m²,其中东部沿海地区、藏滇地热带、环鄂尔多斯盆地区域较高。以上

地壳、地幔的高热流区域与我国的主要地热资源分布区也具有较好的一致性,说明地壳热流、地幔热流作为深部热源,对地热资源的产生均具有一定的控制作用。其中高地壳热流区域与中高温对流型地热资源的分布具有更为明显的一致性。

以上为本文的结论。本次工作尚存在以下问题:①结合地震波反演模型对沉积层的划分仍较为粗略,部分地区对应性较差。②西北、西南等部分地区生热率数据仍较少,影响了研究成果的精确性。③受篇幅的限制,本文未讨论中国陆区岩石圈的三维温度分布。在未来的工作中,我们将以更全面的地质资料为基础,继续增加热流值测点与生热率、热导率样品取样,继续深入开展我国陆区岩石圈热结构及深部地温分布研究。

参考文献略

转自《地球物理学报》,2023,第66卷(12): 5041-5056

山东一地启动供热专项规划修编

潍坊日报 报

为进一步优化城区供热体系、科学引领供热基础设施建设、服务城市绿色低碳发展,市城管局近日启动了中心城区供热专项规划修编工作,结合当前国家相关新政策要求和供热发展实际,分析城区供热运行现状,围绕供热热源、设施、管网资源建设及城市供热发展方向等方面进行统一规划布局、调整,特别是为周边大型热电联产热源长输接入和供暖燃煤锅炉关停替代工作提供遵循指导。

据悉,原《潍坊市中心城区供热专项规划(2016-2030)》自实施以来,推动了城区供热保障能力大幅提升。随着2024年省市供暖燃煤锅炉清洁替代新政策的出台以及城市的快速发展,城区供热能源结构、管网覆盖率、用户需求等均发生了显著变化,部分区域热源紧平衡、管网联通弱等问题日趋显性化,既有供热规划已不能适应当前供热发展需要,通过修编实现系统性规划解决相关

问题势在必行。

本次修编立足当前供热现状,结合城市发展需求,目标是构建更加安全、高效、低碳的供热系统,为城市供热基础设施规划建设提供高水平、前瞻性引领。一方面,多方协同联动,通过社会招标方式选取国内规划实力强、技术力量雄厚、信誉度高的设计单位济南市市政设计院承担,市城管局、各区供热主管部门及各供热企业协同配合、共同参与,采用“实地调研+大数据分析+公众参与”模式,确保成果“严谨周密、接地气、惠民生”。

另一方面,聚焦民生需求,科学规划热源点位,强调多能互补,提升极端天气供热保障能力;完善管网布局,引导形成一网多源、主管网“环状成网、互联互通”供热大网络;加大水源热泵、地热能、工业余热等清洁能源应用占比,推广“绿色低碳”新技术。规划获批后,将作为指导中心城区未来5至10年供热设施建设、改造和管理的重要依据。

增强型CO₂跨临界冷电联产系统性能分析

胡开永¹,朱敬宇¹,孙欢¹,孙志利¹,申江¹,张德全²

1.天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室

2.中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室

摘要:二氧化碳(CO₂)作为一种天然制冷剂,越来越受到人们的重视,但CO₂制冷循环效率低,限制了其应用范围。为提高CO₂制冷循环效率,提出了一种增强型CO₂跨临界冷电联产系统。该系统以有机朗肯循环(ORC)回收CO₂跨临界循环的部分冷凝热,将其转换成电能,达到提高系统COP的目的。在不同蒸发温度、CO₂冷凝压力和CO₂过热度条件下,分别对比分析了增强型CO₂跨临界循环和传统CO₂跨临界循环COP变化。结果表明:增强型CO₂跨临界循环可以有效提高系统COP,在分析范围内,最大提高率为22%。此外,分析了ORC循环部分使用6种不同有机工质条件下系统COP变化,结果表明:采用R227ea时,系统整体COP值较高。

关键词:CO₂跨临界制冷循环;冷电联产;COP;有机朗肯循环

随着世界对环境问题关注度的提高和对能源需求的增加,二氧化碳(CO₂)作为一种天然制冷剂,凭借其自身优良的特性,成为制冷与空调领域最具发展前景的替代制冷剂^[1-2]。根据工作压力的不同,CO₂制冷循环可分为亚临界循环、跨临界循环和超临界循环。目前很多学者对以上系统性能进行了研究^[3-5]。

杨俊兰等^[6,7]对跨临界循环和常规单级压缩制冷循环的性能进行了对比分析,并针对跨临界循环开展了焓经济分析,结果表明单级CO₂跨临界循环性能低于常规制冷循环。边煜竣等^[8]对CO₂两级压缩的几种不同循环模式进行了热力学对比分析,认为两级节流、中间不完全冷却的COP最大。申江等^[9]对CO₂冷风机性能同传热温差、循环倍率、迎面风速等参数之间的关系进行实验研究。Sarkar^[10]等对带有平行压缩经济器、平行压缩结合过冷器和多级压缩系统进行性能分析,结果表明在较低蒸发温度条件下,平行压缩经济器是一种有效提高系统效率的方法。代宝民等^[11]对采用非

共沸混合工质的机械过冷CO₂跨临界循环进行性能分析,结果表明系统COP的提升受混合制冷剂的温度滑移影响显著。Gullo等^[12]对超市用多喷射CO₂并行压缩系统进行了能耗分析,并且和R404A直膨系统和传统CO₂并行压缩系统进行了对比。

为进一步提高CO₂跨临界循环的效率,本文提出一种耦合有机朗肯循环(ORC)系统的增强型CO₂跨临界循环,该循环将CO₂跨临界循环的高温冷凝热作为热源驱动有机朗肯循环发电,减小系统的净耗功,从而提高系统的总体效率。

1 循环系统和模型构建

1.1 系统原理介绍

图1为CO₂跨临界制冷循环和增强型CO₂跨临界循环系统的原理图,其中,图(a)为CO₂跨临界循环原理图,图(b)为增强型系统原理图。

CO₂跨临界制冷循环中,4-1过程为液态的二氧化碳吸热汽化制冷的过程,1-2过程为汽化后的二氧化碳进入压缩机的压缩过程,经压缩后的二

氧化碳压力高于临界压力,2-3过程为在超临界状态下气态的二氧化碳定压放热过程,3-4过程为节流过程,以上四个过程构成一个完整的循环。在增强型CO₂跨临界制冷循环系统中,CO₂跨临界循环高温高压侧的流体作为驱动有机朗肯循环的热源,在有机朗肯循环系统中,7-8过程为有机工质高压气体膨胀做功发电过程,8-9过程为做功后的乏气在冷凝器中由气体冷凝成液体的过程,9-10过程为液态有机工质在工质泵中的升压过程,10-7过程为液态有机工质吸收CO₂跨临界循环释放冷凝热由液态变成高温高压气态过程,以上四个过程构成一个完整的有机朗肯循环。

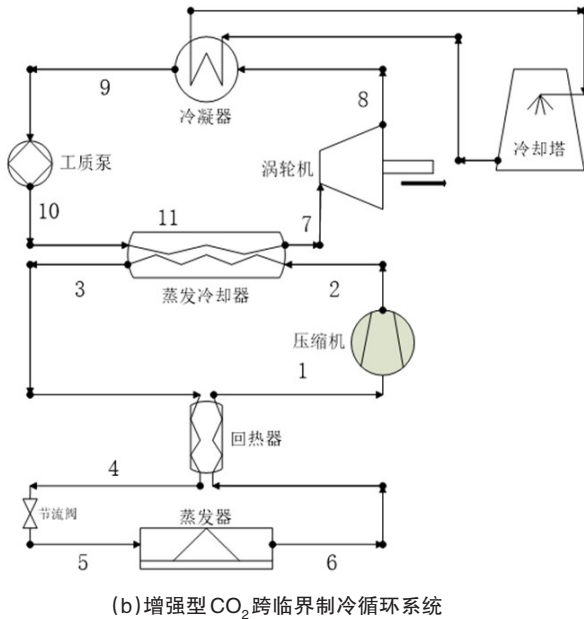
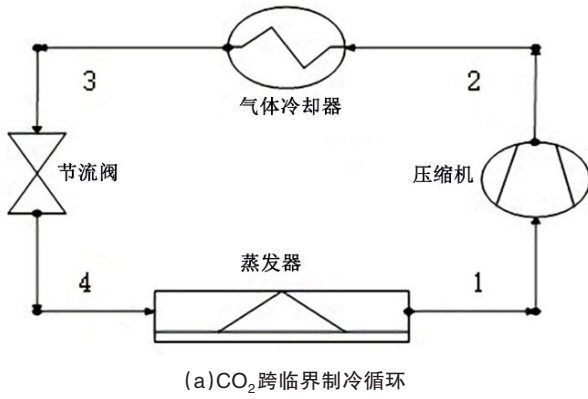


图1 循环系统原理图

1.2 系统数学模型

数学模型建立基于以下假设条件:

(1)系统为稳态运行,各点状态不随时间而变化;

(2)忽略管道内的压降,忽略管道热损失;

(3)系统中压缩机和汽轮机的工作内效率为定值,不随工况的变化而变化;

系统各部件的数学模型如下所示^[13,14]:

CO₂跨临界制冷循环可通过公式(1)~(12)计算得出。

压缩机功耗:

$$W_{com} = (h_2 - h_1) q_{mr} \quad (1)$$

其中:

$$h_2 = (h_{2s} - h_1) / \eta_c + h_1 \quad (2)$$

式中: q_{mr} 为 CO₂ 质量流量, kg/s; h 为焓值, kJ/kg; η_c 一压缩机内效率, 取 0.75。

蒸发器中制冷量:

$$q_e = (h_1 - h_4) q_{mr} \quad (3)$$

性能系数 COP:

$$COP' = \frac{q_e}{W_{com}} \quad (4)$$

增强型 CO₂ 跨临界制冷循环蒸发冷却器内换热量:

$$q_{ec} = (h_2 - h_3) q_{mr} \quad (5)$$

汽轮机中膨胀做功:

$$W_t = (h_7 - h_8) q_{orc} \quad (6)$$

其中,

$$h_8 = h_7 - \eta_t (h_7 - h_{8s}) \quad (7)$$

式中: q_{orc} 为 ORC 循环工质流量, kg/s; η_t 为膨胀机内效率, 取 0.75; h_{8s} 为膨胀机等熵膨胀终点。

发电量:

$$W = W_t \eta_m \quad (8)$$

式中: η_m 为发电机机械效率, 取 0.95。

冷凝器散热量:

$$q_{con} = (h_8 - h_9) q_{orc} \quad (9)$$

工质泵耗功:

$$W_p = (h_{10} - h_9) q_{orc} \quad (10)$$

$$h_{10} = h_9 + (h_{10s} - h_9) / \eta_p \quad (11)$$

增强型 CO₂ 跨临界循环 COP:

$$COP' = \frac{q_e}{(W_{com} - W + W_p)} \quad (12)$$

2 结果与讨论

2.1 蒸发温度对系统性能的影响

图2为CO₂增强型跨临界循环与传统跨临界CO₂独立循环COP同蒸发温度的关系曲线,其中有有机朗肯循环部分采用有机工质为R227ea。从图中可以看出,随着蒸发温度的增加,两种循环的COP均有较大程度的提高。但在固定蒸发温度条件下,增强型跨临界循环COP值高于传统跨临界循环,主要原因是由于部分冷凝热经过ORC系统转化成电能,从而减少了系统的净耗功。以蒸发温度为0℃为例,增强型跨临界循环COP值为1.90,传统跨临界循环COP值为1.73,增加率为9.83%。蒸发温度从-10℃升高至10℃,传统跨临界的COP从1.41升高至2.13,增强型跨临界循环的COP从1.60升高至2.31。

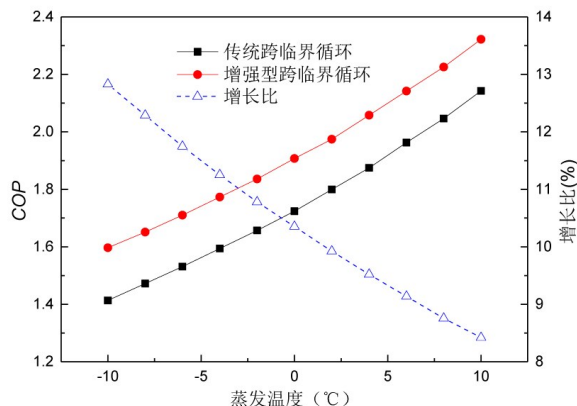


图2 COP同蒸发温度关系

2.2 蒸发冷凝压力对系统性能影响

图3为CO₂增强型跨临界循环与传统跨临界CO₂独立循环COP随蒸发冷凝压力的变化曲线,其中有有机朗肯循环部分采用有机工质为R227ea。从图中可以看出,随着冷凝压力的升高,两种循环的COP均呈下降趋势。冷凝压力从15 MPa升高至25 MPa,独立循环的COP从1.64降低至1.26,增强型循环的COP从1.83降低至1.54,变化过程中增强型循环的COP一直高于独立循环。冷凝压力越

高,独立循环的COP下降得越快,而增强型循环的COP虽然也有下降,但下降的较为缓慢。随着冷凝压力的升高,COP的增量从11.7%升高至22%,因此,采用增强型循环是提高系统COP的一种有效方式。

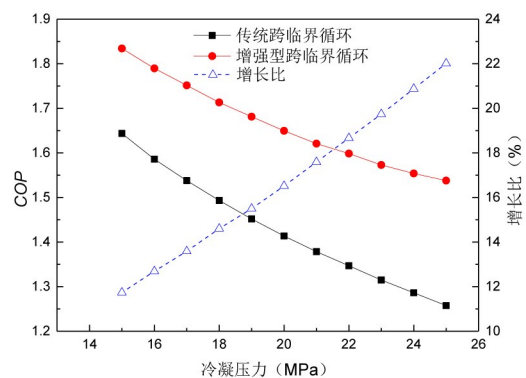


图3 COP随CO₂冷凝蒸发压力的变化

2.3 跨临界二氧化碳循环过热度变化

图4为增强型CO₂跨临界循环与传统跨临界CO₂独立循环COP随CO₂过热度变化的曲线,其中有有机朗肯循环部分采用有机工质为R227ea。从图中可以看出,随着CO₂过热度的提高,两种循环的COP均有一定程度的提高。过热度从5℃升高至15℃,跨临界CO₂独立循环的COP从1.36升高至1.43,增强型循环的COP从1.54升高至1.64。随着CO₂过热度的升高,增强型循环同CO₂独立循环相比,COP的增量从12.65%升高至13.30%。

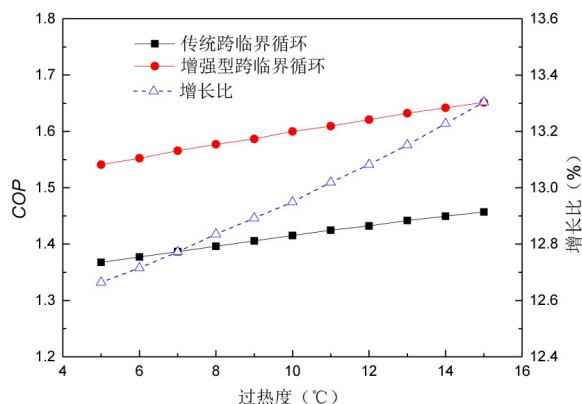


图4 COP随CO₂过热度的变化

2.4 有机工质对增强型跨临界循环性能的影响

选取 6 种有机工质, 分别为 R113、R123、R134a、R152a、R227ea、R1234yf。它们的主要物理性质参数如表 1 所示。

图 5 为不同使用 6 种不同有机工质时, 系统 COP 随 CO_2 冷凝压力变化的曲线图。从图 5 中可以看出, 随着跨临界 CO_2 冷凝压力的升高, 6 种有机工质的 COP 均呈下降趋势, R113、R123 以及 R152a

这 3 种工质 COP 的变化情况相同。冷凝压力从 12MPa 升高至 16MPa 的过程中, COP 从约 1.92 降低至 1.73, 下降了约 9.9%。其余 3 种工质 R1234yf、R227ea、R134a, 在冷凝压力从 12MPa 升高至 16MPa 的过程中, R227ea 的 COP 高于 R134a 和 R1234yf, 其中采用 R227ea 时 COP 值最高, 当冷凝压力为 12MPa 时, 增强型系统 COP 为 1.93。

表 1 有机工质物性参数

工质名称	相对分子质量[g/mol]	三相点[K]	正常沸点[K]	临界温度[K]	临界压力[kPa]
R113	187.38	236.93	320.74	487.21	3392.2
R123	152.93	166.0	300.97	456.83	3661.8
R134a	102.03	169.85	247.08	374.21	4059.28
R152a	66.05	154.56	249.13	386.41	4516.75
R227ea	170.03	146.35	256.81	374.9	2925.0
R1234yf	114.04	220	243.7	367.85	3382.2

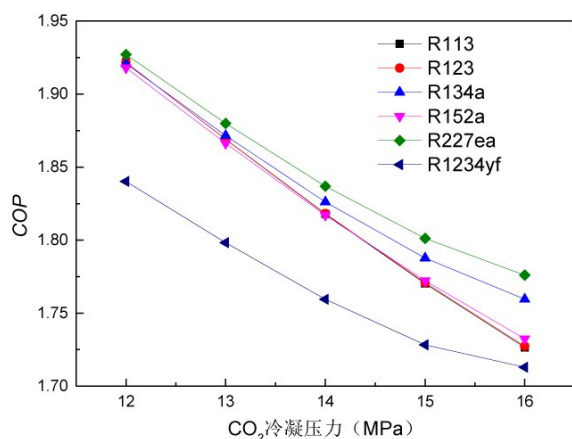


图 5 CO_2 冷凝蒸发压力的变化

3 结论

(1) 在相同蒸发温度条件下, 增强型跨临界循环 COP 值高于传统跨临界循环, 蒸发温度为 0°C 为例, 增强型跨临界循环 COP 值为 1.90, 传统跨临界循环 COP 值为 1.73, 增加率为 9.83%, 蒸发温度从 -10°C 升高至 10°C , 独立循环的 COP 从 1.41 升高至

2.13, 增强型跨临界循环的 COP 从 1.60 升高至 2.31。

(2) 随着 CO_2 冷凝压力的升高, 两种循环的 COP 均呈下降趋势, 冷凝压力越高, 独立循环的 COP 下降得越快, 而增强型循环的 COP 虽然也有下降, 但下降的较为缓慢。随着冷凝压力的升高, COP 的增量从 11.7% 升高至 22%, 因此, 采用增强型循环是提高系统 COP 的一种有效方式。

(3) 提高系统压缩机排放 CO_2 过热度, 可以提高系统 COP, 过热度从 5°C 升高至 15°C , 跨临界 CO_2 独立循环的 COP 从 1.36 升高至 1.43, 增强型循环的 COP 从 1.54 升高至 1.64。

(4) 有机朗肯循环部分工质的选择会影响系统整体的 COP, 选用 6 种不同工质: R113、R123、R134a、R152a、R227ea、R1234yf, 结果表明, 采用 R227ea 时, 系统整体 COP 值较高。

参考文献 略

转自《冷藏技术》2021, 44(01): 40-44

有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统联产性能研究

李太禄¹, 贾亚楠¹, 孟楠¹, 刘青华¹, 秦浩森¹, 孔祥飞^{1,*}

1. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300130

摘要:摘要:以中高温地热作为驱动热源,将有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环相结合,提出了中高温地冷热热电联产系统。基于热力学第一和第二定律,构建了冷热电联产热力学优化模型,并对热源温度120~200℃范围内的系统性能进行了模拟计算和分析,比较了 Cyclohexane、Pentane、n-Heptane、n-Octane、n-Nonane、n-Decane、n-Hexane 及 Isopentane 八种不同工质的热力学性能。结论显示:有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统可以实现冷热电联产,根据季节需求不同灵活调控;Isopentane 发电性能最佳,Isopentane 制冷性能最佳;回收冷却水排放的热量可以大大提高耦合系统热效率,热效率高达90%多。

引言

上个世纪,世界能源消费迅速增长,预计今后几十年还将继续增长。考虑到人口、经济、生活水平等方面的影响,预计未来30年全球能源使用量将增加56%,传统化石能源也日益耗竭,地热能作为一种安全稳定的新能源有广阔的应用前景及研究价值,广大研究者就地热能发电技术进行了广泛且深入的研究。

在中低温地热能中,有机朗肯循环(ORC)发电系统在技术、经济、发电效率等方面综合考虑优于其他系统。但是传统的ORC难以将中低温的地热能有效地转化为电能,一般认为,仅有10%~15%的热能可以转化为电能,大量的热量被浪费,因此众多的研究者在ORC系统结构、工质优选、循环参数优化等方面做了大量工作。Vaja I和Gambarotta A对三种ORC循环(基本ORC、预热ORC和回热ORC)进行了性能比较,发现预热ORC可以提高12.5%的发电效率。Sun J等人研究了不同影响因素下单压ORC和双压ORC的发电效率。Wei F等人^[6]以5种不同工质建立系统经济模型,对不同排气温度下ORC和IORC的经济性进行比较分析。只有当排气温度较高时IORC才具有优势。

Eyerer S等人提出了一种直接注射式ORC-DLI的新型操作方式。实验和仿真结果表明,该方法可以有效地降低排气温度40K。Weiß A P等人研究了在小于100kW的小型ORC系统中微型涡轮发电机组在技术经济上的优势。Qiu K和Thomas M等人研究膨胀阀对ORC系统的影响,用涡旋式压缩机代替传统的膨胀阀,转速越高,系统输出功率越大。Gao P等人提出一种新型重力式无泵ORC,在80~95℃的热水温度下,能源效率为2.4~3.1%,由于它的低成本、高效率,在小型系统中是适用的。Liu C和Liu P等人对纯工质ORC(BORC)和非共沸混合工质的ORC(MORC)循环发电性能进行比较,结果表明两者相比MORC的净工输出率增加2.4~5.3%。Fang Y和Yang F等人分别对高低温临界温度下的纯工质和混合工质进行热力经济性评价,研究发现0.9 toluene/0.1 decane混合工质热经济性最佳。Mirzaei M和Ahmadi M H等人从能量、经济及效率方面比较了几种不同纯工质,经分析发现m-xylene、P-xylene and Ethylbenzene与其他研究的工作流体相比,具有更高的净功率和更低的总成本。Eyerer S等人研究用GWP值较低的R1224yd(Z)和R1233zd(E)代替R245fa,

R1233zd(E)的热效率较R245fa更高,R1224yd(Z)的热效率与R245fa相似。Braimakis K和Karellas S对双级ORC(DSORC)的蒸发压力、冷凝温度等参数进行优化,并将双级DSORC与单级ORC对比发现DSORC增加25%的火用效率。

据国际制冷协会估计,制冷行业占能源总消费量的10~20%。根据Li C等人的研究,夏季供应给城市的电力大约有30~50%被空调系统所利用。因此近年来,相较于纯发电系统,冷热电联产耦合系统得到越来越多的关注与研究。冷热电联产地热系统的热转换效率高于纯地热电厂,一般为60%。Sun W和Yue X等人通过将吸收式制冷循环(ARC)与喷射式制冷循环(ERC)相结合来回收低温烟气中的余热,研究了基于ORC循环的冷电联产循环。Mohammadi A等人提出了一种燃气轮机、ORC循环和吸收式制冷循环的混合系统,作为住宅制冷、供热和供电的综合系统。Lee I和Tester J W等人为了使地热能得到充分利用,分析了热电联产(CHP)系统、冷电联产(CCP)系统、冷热电联产(CCHP)系统。杨新乐等人提出了一种新型的城市低温地热冷热电联产(ORC-CCHP)系统,以吸收式循环作为制冷循环,以太阳能作热量补助。Yin J和Yu Z等人研究了以Kalina与吸收式制冷相结合的冷电联产循环,发现联产系统运行参数优于独立系统。

传统的冷热电联产系统通过对中低温热源的热回收以及吸收式制冷实现,产生的电能直接供应给用户,发电后的余热通过热回收系统向用户供热、供冷,满足多种负荷的需求,系统主要还是以发电为主,吸收式制冷需要其他热源的辅助或再增加压缩式制冷设备。而ORC-VCC-CHR系统主要为了满足制冷的需求,在制冷季节,有机朗肯循环的输出功直接用于驱动压缩式制冷机为建筑供冷;在非制冷季节,有机朗肯循环的输出功用于发电或者其他用途;回收的冷凝热可全年提供生活热水。Nasir M T和Kim K C比较了7种工质在ORC-VCC系统中的热力学表现,结果表明R134a ORC-Isobutane VCC是最佳组合。Li H和Bu X等人以COP及单位制冷量下的工质质量流量为目标参数,研究了4种烃类化合物在ORC-VCR系统中

的表现,结果表明当锅炉出口温度在60~90℃时, butane是最佳的循环工质。王令宝等人研究了低温太阳能有机朗肯-蒸汽压缩制冷循环工质及系统优化,从热力学角度分析,R123是最适合的循环工质。Karellas S等人对生物质联合太阳能驱动ORC-VCC系统进行了热力学分析,循环工质采用R245fa,研究了过热器和回热器对系统性能的影响。Wali以太阳能为驱动热源,评估了R11、R113、R114以及FC75和FC88作为ORC-VCC的工作流体性能,研究认为R113和FC88是最佳的工质。Egrican和Karakas对太阳能ORC-VCC系统进行了第二定律分析,该系统分别使用R114和R22作为ORC和VCC的工作流体。

本文以中低温地热能作为驱动热源,提出了有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环相结合的冷热电联产系统。利用工程方程求解器(EES)软件,综合热力学第一、第二定律建立了耦合系统热力学模型,以Cyclohexane、Pentane、n-Heptane、n-Octane、n-Nonane、n-Decane、n-Hexane及Isopentane作为系统工质,研究了耦合系统的发电性能、制冷性能、减排性能及综合性能。

1 系统介绍

图1和图2分别为有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统的流程图和 $T-s$ 图。与单纯的有机朗肯循环系统不同的是,耦合系统结合压缩式制冷循环为空调房间提供冷量,并回收冷凝器中的热量加以利用。

有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统包括蒸发器1,蒸发器2,汽轮机,发电机,冷凝器,工质泵,热水泵,冷却水泵,压缩机及节流阀。系统特点:整个系统包括有机朗肯循环(1-2-5-6-1)和蒸汽压缩制冷循环(10-11-5-9-10)两个子循环;两个循环用同一种工质作为工作流体;有机朗肯循环的汽轮机和蒸汽压缩制冷循环的压缩机通过机械轴相连,汽轮机输出的机械功用来驱动压缩机、泵和发电;两个循环共用一个冷凝器。工作流程:黑色线条为有机朗肯循环部分,地热流体流经蒸发器1与工质换热,蒸发后的工质进入汽轮机做功(1-2),汽轮机所做的功一部分带动制冷循环

的压缩机工作,一部分驱动发电机工作,汽轮机排出的乏汽进入冷凝器后凝结产生冷凝液(2-5),冷凝器中排出的冷凝液进入工质泵加压(5-6),工质经工质泵加压后进入蒸发器(6-1),完成一个有机朗肯循环;红色线条为蒸汽压缩制冷循环,汽轮机驱动压缩机工作,工质在压缩机内被压缩,进入冷凝器,冷凝成饱和液状态(11-5),进入节流阀,在节流阀处绝热节流降温、降压至对应于循环起始压力的湿饱和和蒸气状态(5-9),再进入蒸发器2气化吸热(9-10),气化吸热后的工质进入压缩机(10-11),完成制冷循环。30℃~40℃之间的室外新风与温度为24℃的空调房间回风在绝热混合室混合,新回风混合比例保持为1:2,混合空气进入蒸发器2进行换热;蓝色线条为冷却水循环,冷却水为冷凝器提供冷量,同时回收冷却水回水的热量用来供热。

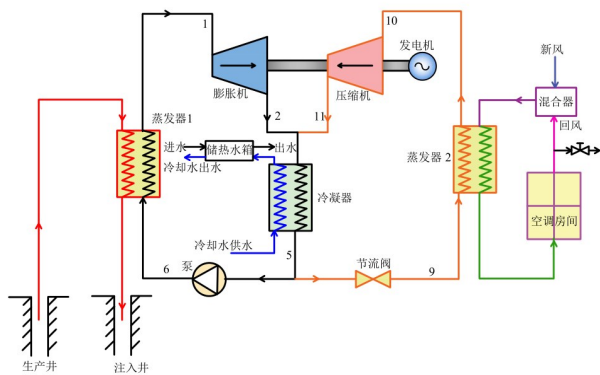


图1 有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统流程图

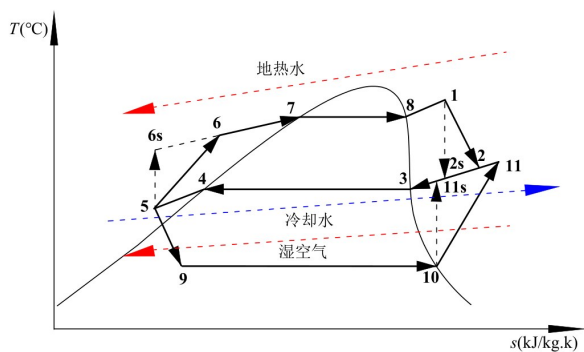


图2 有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统T-s图

2 数学模型

为方便建立耦合系统数学模型,基于热力学

第一定律和热力学第二定律,对模型做如下假设:

- (1)系统各组成部分均在稳态条件下运行;
- (2)工质在蒸发器、冷凝器和泵中的压降均被忽略;
- (3)系统中有机工质动能和势能的变化均被忽略;
- (4)循环中所有热交换器的夹点温差取5℃;
- (5)冷凝器冷凝温度为50℃,冷凝器出口处的有机工质为过冷液体,过冷度为5℃。系统蒸发器1出口处的有机工质为过热蒸汽,过热度也为5℃;VCC循环的蒸发温度为7℃。
- (6)工质在蒸发器、冷凝器和泵中的压降均被忽略;
- (7)地热流体温度在120~200℃范围内,地热流体质量流量为40kg/s。
- (8)假设空气的密度和比热分别为1.2 kg/m³和1 kJ/kg·K;水的比热4.18kJ/kg·K。

表1 模拟计算相关参数

项目	参数
大气压力(kPa)	101.3
环境温度T ₀ (℃)	25 ^[34]
地热水温度(℃)	120~200
地热流体质量流量(kg/s)	40
冷凝器冷凝温度(℃)	50
冷却水入口温度/回水温度(℃)	35
冷却水出口温度/供水温度(℃)	45
冷却水最终出水温度(℃)	36
压缩机的等熵效率(%)	88
汽轮机等熵效率(%)	88
工质泵等熵效率(%)	75
冷却水泵机械效率(%)	75 ^[34]
热水泵机械效率(%)	75
机械能转换效率η _m (%)	97 ^[34]
发电机效率η _e (%)	98 ^[34]

有机朗肯循环:

(1)汽轮机:

$$\eta_t = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2s}) \quad (1)$$

$$W_t = m_{wf} (h_1 - h_2), \quad (2)$$

$$m_{wf} = c_{gw} \cdot m_{gw} \cdot (t_{gwin} - t_{pp}) / (h_1 - h_o) \quad (3)$$

式中: W, m, h, t 和 η 分别为功率(kW), 质量流量(kg/s), 比焓值(kJ/kg), 温度(°C)和效率; 下标 t, wf, gw 和 pp 分别为汽轮机, ORC 循环工作流体, 地热流体和泵点。

$$I_t = T_0 \cdot m_{wf} (s_2 - s_1) \quad (4)$$

式中: I, T_0 和 s 分别为系统总不可逆损失(kW), 环境温度(°C)和熵(kJ/kg.k)。

(2) 工质泵:

$$\eta_p = (h_{6s} - h_5) / (h_6 - h_5) \quad (5)$$

$$W_p = m_{wf} (h_6 - h_5) \quad (6)$$

$$I_p = m_{wf} T_0 (s_6 - s_5) \quad (7)$$

式中: 下标 p 为泵。

(3) 蒸发器 1:

$$Q_{e1,sub} = m_{wf} (h_7 - h_6) \quad (8)$$

$$Q_{e1,eva} = m_{wf} (h_8 - h_7) \quad (9)$$

$$Q_{e1,pre} = m_{wf} (h_1 - h_8) \quad (10)$$

$$Q_{e1} = Q_{e1,sub} + Q_{e1,eva} + Q_{e1,pre} = m_{wf} (h_1 - h_6) \quad (11)$$

式中: Q 为热流量(kJ); 下标 e1, sub, eva 和 pre 分别代表蒸发器 1、过冷段、蒸发段和过热段。

(4) 冷凝器:

$$Q_{c1} = m_{wf} (h_2 - h_5) \quad (12)$$

$$m_{cw1} = Q_{c1} / c_{cw} \cdot t_{cw} \quad (13)$$

$$Q_{h1} = c \cdot m_{cw1} (t_{cwout1} - t_{cwout2}) \quad (14)$$

式中: c 和 Q_h 分别为定压比热容(kJ/kg.c)和回收的热量(kJ); 下标 c 和 cw 分别为冷凝器和冷却水; 下标 cwout1 和 cwout2 分别为冷却水出水换热前后。

$$W_{hp} = m_{gw} \cdot g \cdot H_1 / 1000 \cdot \eta_{hp} \quad (15)$$

$$W_{cp} = m_{cw} \cdot g \cdot H_2 / 1000 \cdot \eta_{cp} \quad (16)$$

式中: H 和 g 分别为泵的扬程(m)和重力加速度(m/s²); 下标 hp 和 cp 分别为热源侧泵和冷却水泵。

$$W_{net} = \eta_m \cdot \eta_g \cdot W_t - W_p - W_{hp} - W_{cp} \quad (17)$$

式中: W_{net} 为净输出功率(kW); η_m 和 η_g 分别代表机械能转换效率和发电机效率。

$$\eta_{th,ORC} = (W_{net} + Q_{h2}) / Q_{e1} \quad (18)$$

式中: $\eta_{th,ORC}$ 为有机朗肯循环热效率。

蒸汽压缩制冷循环:

(1) 压缩机:

$$W_{comp} = m_{vcc} (h_{11} - h_{10}) \quad (20)$$

式中: 下标 comp 为压缩机, VCC 为蒸汽压缩制冷循环。

$$I_{comp} = T_0 \cdot m_{vcc} (s_{11} - s_{10}) \quad (21)$$

(2) 蒸发器 2:

$$Q_{e2} = m_{vcc} (h_{10} - h_9) \quad (22)$$

$$I_{e2} = T_0 [m_{vcc} (s_{10} - s_9) + m_{air} (s_{airout} - s_{airin})] \quad (23)$$

式中: 下标 e2 为蒸发器, air 为混合空气。

(3) 冷凝器:

$$Q_{c2} = m_{vcc} (h_2 - h_5) \quad (24)$$

$$m_{cw2} = Q_{c2} / c_{cw} \cdot t_{cw} \quad (25)$$

$$Q_{h2} = c \cdot m_{cw2} (t_{cwout1} - t_{cwout2}) \quad (26)$$

(4) 节流阀:

$$I_v = T_0 \cdot m_{vcc} (s_9 - s_5) \quad (27)$$

式中: 下标 v 为节流阀。

$$COP_{vcc} = Q_{e2} / W_{comp} \quad (28)$$

有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷耦合循环:

(1) 冷凝器:

$$Q_{c,sub} = (m_{wf} + m_{vcc}) (h_4 - h_5) \quad (29)$$

$$Q_{c,eva} = (m_{wf} + m_{vcc}) (h_3 - h_4) \quad (30)$$

$$Q_{c,pre} = (m_{wf} + m_{vcc}) (h_2 - h_3) \quad (31)$$

$$Q_c = Q_{c,sub} + Q_{c,eva} + Q_{c,pre} = (m_{wf} + m_{vcc}) (h_2 - h_5) \quad (32)$$

$$= Q_{c1} + Q_{c2} \quad (32)$$

$$m_{cw} = Q_c / c_{cw} \cdot t_{cw} = m_{cw1} + m_{cw2} \quad (33)$$

$$I_c = T_0 [(m_{wf} + m_{vcc}) (s_5 - s_2) + m_{cw} (s_{cwout} - s_{cwin})] \quad (34)$$

总不可逆损失:

$$I_{total} = I_t + I_c + I_p + I_{e1} + I_{e2} + I_{comp} + I_v \quad (35)$$

总回收热量:

$$Q_h = c \cdot m_{cw} (t_{cwout1} - t_{cwout2}) = Q_{h1} + Q_{h2} \quad (36)$$

输出电功率:

$$W_e = \eta_m \cdot \eta_g (W_t - W_{comp}) - W_p - W_{hp} - W_{cp} \quad (37)$$

冷电效率:

$$\eta_{th,ORC-VCC} = (W_e + Q_{e2}) / Q_{e1} \quad (38)$$

冷热电效率:

$$\eta_{th,ORC-VCC-CHR} = (W_e + Q_{e2} + Q_h) / Q_{e1} \quad (39)$$

热源热回收效率:

$$\eta_{gw} = (W_e + Q_{e2} + Q_h) / (Q_{e1} + Q_p) \quad (40)$$

式中: Q_p 为地热水排放到环境中的热量。

CO₂减排量:

$$M_{CO2} = \alpha_c \times m_c \times \sum_{Day=1}^{Day=365} \square \sum_{Hour=1}^{Hour=24} \square \times W_t / 1000 \quad (41)$$

式中: M_{CO_2} 为每年 CO_2 减排量 (t/a); α_c 为单位电量耗煤量, 取 0.4 kg/kWh ; m_c 为单位质量标煤 CO_2 排放量, 取 $2.7 \text{ tCO}_2/\text{t 煤}$ [35]。

3 结果与讨论

研究所用的 Cyclohexane、n-Decane、n-Heptane、n-Hexane、n-Nonane、n-Octane、Pentane 和 Isopentane 八种工质热力性质见表 2 [36]。所选工质的 ODP 都为 0, 对臭氧层没有破坏, GWP 值也都很小, 这些烷类工质对环境没有危害。图 3 是利用 NIST REFPROP 软件得出的八种工质的 T-s 图, Isopentane 和 Pentane 的临界温度比较低, 都小于 200°C , 其他六种的临界温度相对较高, 基本在 300°C 左右。我们考虑的循环是亚临界循环, 热源温度范围在 $120\sim 200^\circ\text{C}$, Pentane 和 Isopentane 有可能达不到热源温度为 200°C 下的最大蒸发温度, 经

过数据分析, 在这个热源温度范围内, 只有 Isopentane 受到了临界温度的限制, 如图 4, 热源温度为 200°C 时, 蒸发温度最大到 187°C 。

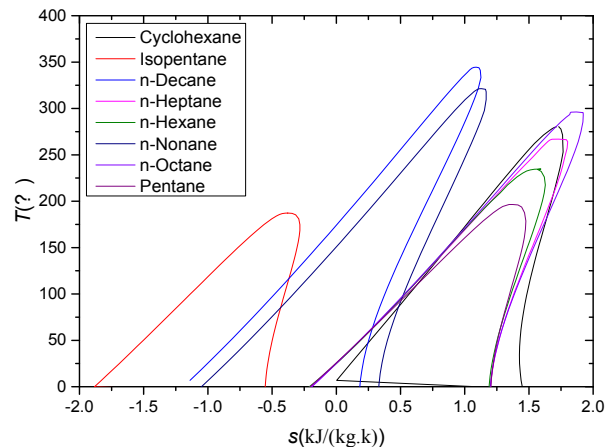


图3 八种工质 T-s 图

表2 八种工质热力学物性表

工质	ODP	GWP	摩尔质量 (kg/kmol)	临界温度 ($^\circ\text{C}$)	临界压力 (MPa)
Cyclohexane	0	很低	84.16	280.40	4.05
n-Decane	0	很低	142.28	344.50	2.01
n-Heptane	0	很低	100.20	270.13	2.73
n-Hexane	0	很低	86.18	237.82	3.04
n-Nonane	0	很低	128.26	324.55	2.28
n-Octane	0	很低	114.23	296.00	2.49
Pentane	0	很低	72.15	196.40	3.38
Isopentane	0	很低	72.15	190.35	3.38

3.1 系统发电性能

图 4 是在不同热源温度和蒸发温度下的系统总输出功率变化图, 所有工质的变化趋势一致, 以 Isopentane 工质为例。输出功率只考虑有机朗肯循环, 随着蒸发温度 t_{e1} 的升高, 系统汽轮机的总输出功率呈现出先增大后减小, 中间存在极大值的变化趋势, 这是因为系统输出功率, 主要受到有机朗肯循环的工质质量流量和汽轮机的比功率这两个参数影响。在冷凝温度一定的条件下, 蒸发温度较低时, 尽管工质的质量流量较大, 由于比功率较

小, 故系统输出功率很小; 相反的, 蒸发温度较高时, 比功率虽然较大, 但是工质的质量流量较小, 对应的系统输出功率仍然很小; 在每一个热源温度下存在一个最佳的蒸发温度使得系统的总功率达到最大值。在所研究的范围内的最佳蒸发温度相对较为集中, 在不同热源温度下, 最佳蒸发温度相差 6°C 左右, 热源温度 $120\sim 200^\circ\text{C}$ 范围内的最佳蒸发温度和最大输出功率如表 3 所示。从图中可以发现两个相邻最大输出功率之间绝对差值越来越大, 但相对差值越来越小。

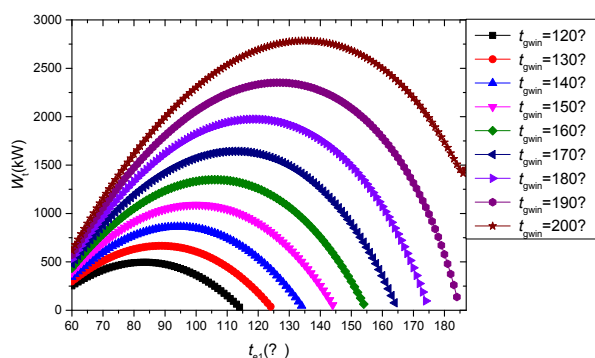


图4 Isopentane在不同热源温度和蒸发温度下的系统总输出功率变化

表3 20~200℃热源温度间的最佳蒸发温度参数表

热源温度(℃)	最佳蒸发温度(℃)	最大输出功率(kW)
120	83	496
130	89	665.8
140	95	863.4
150	100	1091
160	106	1349
170	113	1643
180	120	1975
190	126	2352
200	132	2784

图5是八种工质在不同热源温度下的最大输出功率曲线图,输出功率只考虑有机朗肯循环。图中显示,随着热源温度升高,输出功率呈上升趋势,输出功率主要取决于循环工质质量流量和汽轮机的比功率,热源温度升高,工质质量流量和汽轮机比功率都会增大,在研究范围内,随热源温度升高,Isopentane输出功率增加了2288kW;Isopentane输出功率最大,其次依次是Pentane、n-Hexane、n-Heptane、Cyclohexane、n-Octane、n-Decane、n-Nonane。对于这八种不同工质,汽轮机的比功率数值相近,大概都在60kW左右,所以他们在输出功率上所表现出来的差异性主要受工质质量流量的影响;Cyclohexane和n-Octane、n-Decane和n-Nonane每对的两种工质输出功率只有细微差别,基本上是一致的,如果只考虑输出功率这项参数,每一组里的两种物质可以互为代替;在热源温度较低时,每种工质间输出功率差值较小,热源温

度小于170℃,Isopentane输出功率与n-Nonane输出功率相比较,差值小于10%。随着热源温度升高,工质之间输出功率差值越来越大,热源温度200℃时,Isopentane输出功率与n-Nonane输出功率之差达到了14%。

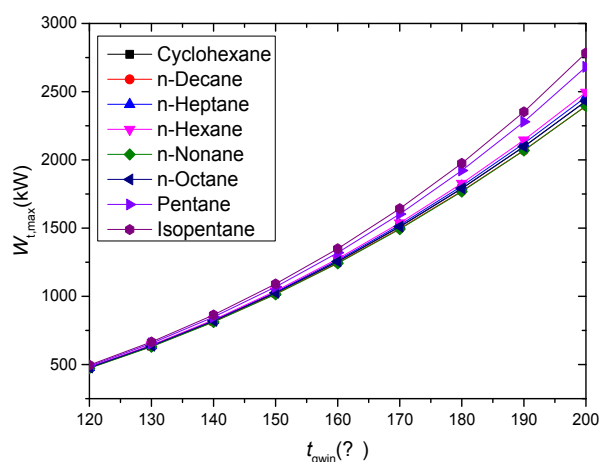


图5 八种工质在不同热源温度下的最大输出功率

3.2 系统制冷性能

为比较八种工质的制冷量,以热源温度180℃、蒸汽压缩制冷循环工质质量流量为1kg/s为工况,图6、图7分别是八种工质在热源温度为180℃时的最大制冷量和COP柱状图。图6显示,以Cyclohexane为工质制冷量是最多的,其次依次是Pentane、n-Heptane、n-Octane、n-Nonane、n-Decane、n-Hexane、Isopentane,制冷量主要取决于VCC循环的工质质量流量和蒸发器的比功率,工质质量流量为定值1kg/s,所以八种工质制冷量在数值上就是蒸发器的比功率;Pentane、n-Heptane、n-Octane这三种工质的制冷量非常接近,相对差值分别为0.17%、0.27%;Cyclohexane的制冷量为333.2kW,Isopentane的制冷量为271.6kW,相对差为18.5%。结合图7工质的COP值,COP最大值、最小值分别为5.22和4.97,对应工质分别为Cyclohexane和Isopentane,其他工质的COP值基本一致。两图数据结合得出Cyclohexane是制冷剂的最佳选择。

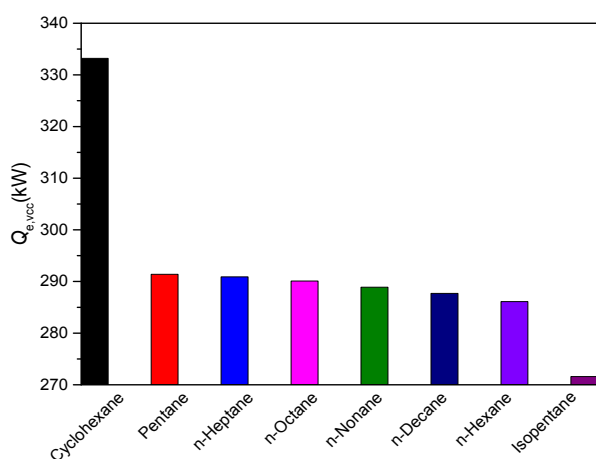


图6 八种工质在热源温度为180℃下的最大制冷量

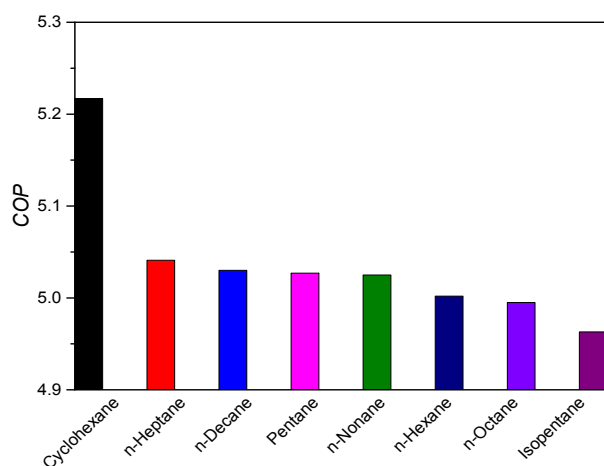


图7 八种工质在热源温度为180℃下的COP值

图8是制冷工质质量流量变化时输出电功率和压缩机功率变化图,以Isopentane为工质,热源温度选择180℃,有机朗肯循环最佳蒸发温度120℃,汽轮机最大输出功率2352kW,假设在理想状况下汽轮机输出功率全部用来驱动压缩机工作,则制冷工质质量流量为36.08kg/s,所以我们选择制冷工质质量流量变化范围0~36.08kg/s。当 m_{vcc} 为36.08kg/s,压缩机功率与净功率的比值是1.22,并不为1;说明汽轮机输出的功率除了驱动压缩机外存在很大一部分损耗,这部分用于泵的正常运行;随着制冷工质质量流量增加,压缩机耗功占比越来越大,即用于制冷所消耗的动力不断增加,取决于制冷工质质量流量和压缩机比功率,压缩机比功率是个定值,所以压缩机功率和制冷

工质质量流量成正比关系;制冷工质质量流量达到31.2 kg/s,压缩机功率与净功率的比值是1,在这种情况下,有机朗肯循环输出的净功全部用来驱动压缩机运行制冷,当制冷工质质量流量超过这个值时,有机朗肯发电循环无法满足制冷需求,可以增大地热流体质量流量或增加外部电源为制冷循环提供动力;随着制冷工质质量流量增加,发电功率越来越小,发电功率受净功率和压缩功率两个参数的影响,随着制冷工质质量流量增加,净功率和压缩功率都是减小的,因此压缩功率越来越小;当 m_{vcc} 为0 kg/s,即制冷循环关闭,此系统只用来发电,最大发电功率为1706kW。

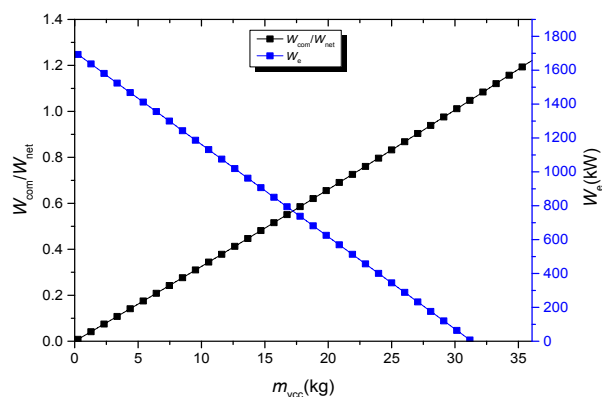


图8 制冷工质质量流量变化时输出电功率和压缩机功率变化

3.3 系统总体性能

图9、图10分别是在不同热源温度的最佳蒸发温度下耦合系统的冷凝热回收量和热效率、热源热回收效率,经计算八种工质热效率基本一致,以Isopentane工质为例,假设蒸汽压缩制冷循环工质质量流量为1kg/s,冷却水换热温差为9℃。图中随着热源温度的升高,冷却水中回收的热量不断增大,冷凝热与冷却水流量有关,随着热源温度升高,需要的冷却水流量不断增多,所以回收的冷凝热越多。热源温度120℃,系统供热量为6206kW,采暖热负荷定为50W/m²,耦合系统可为124120 m²的区域供热;热源温度200℃时,系统供热量为16480kW,系统可为329600 m²的区域供热。图中显示增加了冷凝热回收的耦合系统的热效率为93%~97%,经计算冷电联产热效率为9%~13%,如果降低冷凝温度,热效率会随之增加,但最多增加

10%左右,两种系统效率差80%左右,在有热需求的区域,冷热电联产系统比冷电联产系统更有优势。;图10显示随热源温度增高,热源热回收效率是不断增加的,热源热回收效率比系统热效率小,这是因为经过蒸发器1后的地热水直接排放到环境中会有很大一部分能量损失,本文主要考虑容易被忽略的冷凝热量,为简化计算地热水直接排放,但这部分地热排水热量可以二次利用。

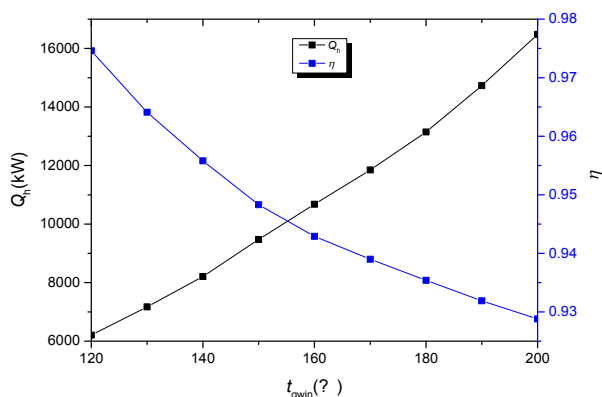


图9 不同热源温度下耦合系统的供热能力和热效率

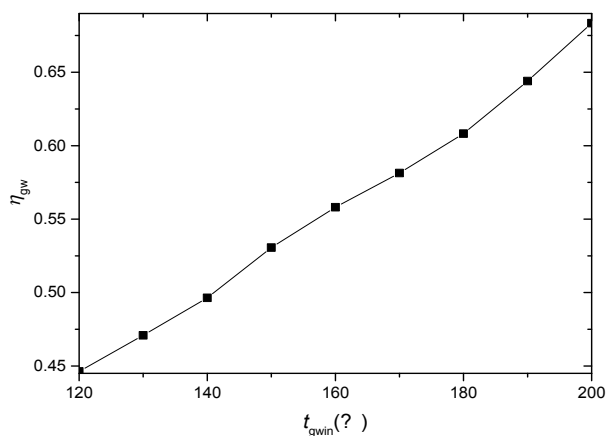


图10 不同热源温度下耦合系统的热源热回收效率

3.4 系统节能减排性能

图11是八种工质在不同热源温度下的每年CO₂燃烧减排量。CO₂燃烧减排量主要取决于输出功率,输出功率越大,CO₂燃烧减排量越大,所以图7中八种工质CO₂燃烧减排量的相对大小和变化趋势和图5是一致的。随热源温度升高,CO₂燃烧减排量逐渐增大,当热源温度从120℃到200℃时,

Isopentane 每年的CO₂燃烧减排量增加17017t;热源温度小于170℃,Isopentane 与 n-Nonane CO₂燃烧减排量差值小于10%。随着热源温度升高,工质之间CO₂燃烧减排量差值越来越大,热源温度200℃时,Isopentane 与 n-Nonane CO₂燃烧减排量之差是14%,和图5一致。Isopentane 的节能减排性能是最佳的。

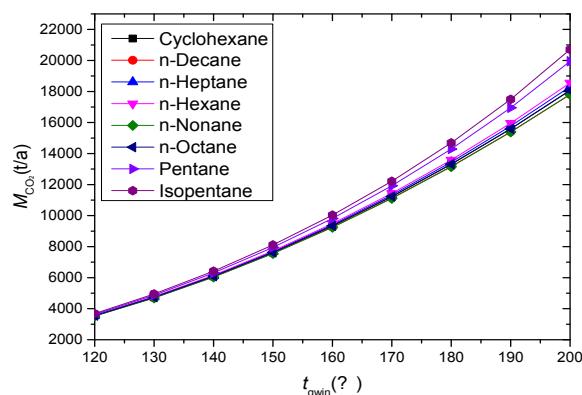


图11 八种工质在不同热源温度下每年CO₂燃烧减排量

4 结论

将有机朗肯循环与蒸汽压缩式制冷相结合,回收冷凝器的余热为用户供热,构成冷热电联产系统,以 Cyclohexane、Pentane、n-Heptane、n-Octane、n-Nonane、n-Decane、n-Hexane 及 Isopentane 为选择工质,对系统性能进行分析,在本文研究的范围内,主要结论如下:

(1)随热源温度升高,系统汽轮机输出功率不断增大,Isopentane 总输出功率最大。

(2)Cyclohexane 的制冷量和制冷性能系数 COP 在所选工质中是最大的。

(3)冷热电联产系统热效率大大提高,高达90%多,比冷电联产系统热源回收效率高出80%左右。

(4)随热源温度升高,系统CO₂燃烧减排量不断增大,Isopentane 减排性能最佳。

参考文献略

转自《河北工业大学学报》2021.6 Vol.50 No.3

立足深探浅采借助多能互补高质量发展地热产业

庞忠和

中国科学院地质地球物理研究所

2025年是“十四五”规划的收官之年,在新的一年里,中国地热产业和技术研发的发展走向令地热同行们高度关注,受《中国地热》编辑部之邀,在这里谈谈个人一些不成熟的思考,供读者参考和批评。在高质量发展地热产业和打造新的生产力的新时期,我对地热产业发展的期待,可以归结为16个字,即:深探浅采、规模利用、多能互补、智慧地热。

一、深探是保障地热产业可持续发展的关键

到目前为止,中国的地热测量深度绝大多数是在3千米以内进行的,对于更深处的直接地热信息很少。这一现状在一定程度上制约了深层地热的开发利用。众所周知,地球的温度是随着深度增加而升高的,因而,往深部地热能品位会更好,往深处走是必然选择。但是,往深部走意味着开采难度的加大和经济成本的提高。在现有技术经济条件下,6千米基本上可以作为探测的下限。深层地热探测的主要目标,是高品位并且易开采的地热资源。深层地热在3km以下,主攻“双超”地热能,即:超高温(180℃)或者超临界(温度>374℃,压力>22.1MPa)的高品位地热资源,前一类是岩热型,即所谓干热岩地热资源,后一类是水热型中的佼佼者。

国外如美国、欧盟和冰岛已经有多年的探索,获得不错的进展。去年中国在海南海口福山凹陷中打到的188℃高温地热井,属于前一类。未来目标区域深层地热状况的调查和地热资源分布规律的研究需要加强。国家深地探测计划的实施,

为深层地热探测和评价创造了有利条件,为地热产业的发展带来了新的机遇。

2025年3月1日,由中国石化牵头的“深层地热能富集机理与高效开发全国重点实验室”正式启动,协作单位有大学和中国科学院,因此,这是一个产学研相结合的国家级科技研发平台。搭建这一平台是有识之士多次建议和推动的结果,也是地热行业长期以来的期待。它标志着3km以深的地热勘查、资源评价、热储工程和利用技术研发进入新阶段。根据设计,实验室规划在未来5年内将建设研发中心和三个深层地热开发利用示范基地。

二、浅采是实现地热产业规模化的必由之路

3千米以浅的浅层和中深层地热能仍然是地热利用产业的主战场。纵贯可再生能源发展历程,太阳能光伏技术,因为在荒漠地区的适应性而使其大行其道,铺天盖地的发展,而在大陆架浅海崛起的风电产业更是伸展羽翼飞速发展。地热产业能够从中学到什么?立足于浅部宜于开采的地热资源和应用场景是中国地热过去十多年发展成功经验的总结。在供暖方面,中深层岩热型地热资源开发近年来得到产业青睐,在陕西咸阳等部分地区得到规模化开发利用。受换热半径的局限性影响,这类利用技术的应用场景比较局限。

今后,在条件具备的地区,采用增强地热系统的相应技术可以达到提高效率的目的。采取这种方式使深层地热技术研发和中深层地热资源开发利用相得益彰。油田废弃井改造成为地热井的技

术,可以使地热利用成本大大降低,无论是水热型,还是岩热型都已经有不少案例。

在煤田开采区,煤和热共采、废弃矿山生态修复中的地热开采利用已经提上议事日程。未来油(煤)田变热田,热田变热储,将逐步成为现实。浅层地热利用中的地表水源热泵,包括江水源、城市中水热泵利用规模也取得了新的进展,发展潜力很大。南京江北新区“江水源空调”区域供能项目(完成度50%)规划1200万平方米,是现有项目中的“巨无霸”。可以说,中国地热产业是在“浅采”中逐步实现了地热直接利用的规模化和有效益。在地热发电方面,产业发展举步维艰,是个需要补一补的短板。这也是地热界一直关注和努力的方向。

2025年2月27日国家重点研发计划以西藏古露高温地热发电为落地工程的重大项目在成都召开了启动会,古露地热发电厂预计装机规模20MW,由中国核工业集团投资建设,这标志着我国停滞多年的地热发电产业有望迎来转机。

三、多能互补融合发展更能发挥地热能优势

太阳能光伏、太阳能热利用、风力发电等技术和产业的大规模快速发展,给地热能创造了与其它可再生能源融合利用的有利条件。包括浅层和中深层地热能的融合利用。刚刚兴起的地热储能技术为进行这种融合创造了条件。一方面,地热储能可以帮助抑制太阳能和风能的波动性问题,另一方面,也为地热能不足的地方增强了地热能供热的能力。在东北地区,浅层地热能的利用由于夏冬季节热负荷的不对等,常常出现“冷堆积”的问题,是岩土地温下降,不能适应等级供暖的需求。采用中深层系统为浅层系统补热的技术可以解决这个问题,从而大大提高北方供暖效率。比如:建设中的沈阳铁西宝马工业园浅层地热应用示范项目就属于岩土储能、多能互补技术的应用案例。需要指出的是,地热储能也应该以热能直接利用为主。

前不久,国家能源局分类分批次发布了“全国

可再生能源供暖(制冷)典型案例汇编”,其中涉及地热能供暖(制冷)案例34个。充分说明地热能供暖和制冷这类热能利用得到国家重视,并不是非要发电不可。社会用能很大的比例是热能,在有些城市可以占到一半。而地热能,包括地热储能,在这方面具有独到的优势。

四、智慧地热是地热能高质量发展的助推器

人工智能技术赋能智慧地热产业的升级发展。在勘查技术方面,无人机航磁测量系统使遥感技术如虎添翼。在热储工程技术方面,基于大数据分析的三维地质建模可以大大提升靶区预测精度。在智能化地热开发利用调控方面,热储数字孪生管理系统大大提高实时调控效率,智能化地热储能技术可以使储热效率大幅度提升。

五、几个政策建议

“十五五”是国家实现“碳达峰”目标的决战时期。作为五大非碳基能源之一的地热能必将继续得到大发展,这是难得的机遇期。同时,由于地热能开发利用的复杂性和高投入特点,在市场竞争方面仍然会处于劣势。为使方兴未艾的地热产业得到健康发展,应该鼓励核心技术研发、提升设备制造能力、加强政策引导和扶持。一是重点技术:深部钻探成本控制、热岩体水力压裂技术、多能互补系统集成优化技术、南方湿热地区浅层开发技术适宜性、废弃矿山地热利用的生态修复技术、深部地热开发诱发微震监测预警技术,等等。二是关键设备:地热发电厂成套技术和设备、先进热泵设备,等等。三是产业发展的引导和扶持政策:参照光伏发电和风力发电早期发展阶段的扶持政策,出台深层地热相应的扶持政策。

推行地热开发环境影响信用制度;推行地热开发利用碳足迹评估核算制度;实现纯热能(不耗水)开采利用免除资源税制度;简化地热利用项目管理制度;推广一站式服务模式;出台公共建筑利用地热的强制性政策措施。

转自《中国地热》杂志

关于地热开发利用与Deepseek的问答

戴传山

天津大学机械学院地热中心

最近国产人工智能(AI)大数据模型Deepseek炒的火热,世界瞩目,喜忧者皆有之。不可否认的是未来借助AI大数据模型,包括地热能在内的新能源事业发展将会被提速。出于对Deepseek的好奇,作为初学者,本人对其提出了几个简单问题,如下:

(1)地热开发利用的目的是什么?(思考时间18s)

(2)在地热开发利用的不同研究方向中,如:地质构造、地球物理、地球化学、水文地质、热储模拟、钻井、换热取热、地下环境动态监测、地源热泵、调节控制等,按热用户需求的重要性进行排序。(思考时间43s)

(3)接上一个问题,在地热开发利用的“换热取热”研究方向,从技术原理上分析,包括哪几个环节?各环节的关键技术方向是什么?

问题1的提出主要是想了解一下Deepseek如何看待地热能的重要性,Deepseek对这一问题的回答很全面,甚至考虑到提问者是交作业的学生或是对可再生能源感兴趣的人,随后给出了地热能定义,主要用途以及与其它可再生能源的优势,并举出冰岛实际应用案例。Deepseek把对问题的思考过程也给出文字的形式,体现出其内部的逻辑运算过程,然后输出最终的结论,鉴于篇幅仅将回答概要列出,如下:

地热开发利用的主要目的是通过利用地球内部的热能资源,满足能源需求并促进可持续发展,具体包括以下几个方面:1.提供清洁能源,替代化石燃料;2.减少环境污染与温室气体排放;3.提供稳定可靠的能源供应;4.直接利用热能,提升生活与生产效率;5.推动区域经济发展;6.支持低碳转型与气候目标;7.技术创新与能源安全。

问题2是问Deepseek针对地热开发利用相关

研究方向的相对重要性,我有意识地将一些研究方向从地下向地上列出,Deepseek仍给出了令人信服的回答,特别是在最后补充的一句话,若是“浅层地热能”可提升地源热泵的优先级,自以为“钻井技术”优先重要,但Deepseek将其排在了第二梯队。虽然提问的研究方向后面添有文字“等”,但Deepseek并未给出更多的研究方向,回答概要如下:“在地热开发利用中,各研究方向的重要性排序需围绕“热用户需求”的核心目标(如稳定供能、经济性、安全性、可持续性)展开。以下是基于对用户需求的直接影响和系统整体运行效率的排序及解析:总结排序(按优先级):1.热储模拟;2.水文地质;3.换热取热;4.钻井技术;5.地下监测;6.地球物理;7.地质构造;8.地源热泵;9.调节控制;10.地球化学。此排序可为地热项目规划提供优先级参考,但需根据具体区域资源条件灵活调整(如浅层地热可提升地源热泵优先级)。

问题3是基于Deepseek对第二个问题的答复提出的,回答如下:在地热开发利用的“换热取热”环节中,技术原理的核心是通过流体循环将地下热能高效传输至地面,并转化为可利用的热能或电能。从技术流程上可划分为以下几个关键环节,每个环节涉及不同的关键技术方向:1.热量提取:地热储层与流体循环的耦合;2.热能传输:流体携带热能至地面;3.地面热交换:热能转换与利用;4.回灌与储层再生:维持热储可持续性;5.系统集成与智能调控。地热“换热取热”是一个多学科交叉的复杂系统,需通过储层改造、高效传热、可持续回灌、智能控制四大技术支柱协同突破。未来趋势是向深部(>3km)、高温(>300℃)、低渗透性储层开发,同时结合氢能存储、碳封存等实现多能联供。

转自《中国地热》杂志、地热加

解锁英国地热能的潜力

陈讲运 编译

该报告旨在提供一些技术信息,以补充在 BGS 科学简报提到的,地热能在英国替代常规能源的低碳供暖的潜力。此报告概述了存在于英国的深层地热资源潜力(虽然这里没有讨论区域地热的潜力),以及支撑英国深层地热资源的有效开发和开发所需的财政、政策和监管力度。这些建议适用于英国政府及其部门,以及苏格兰、北爱尔兰和威尔士的下属政府,以及各自国家的政策领域,如热政策和规划等。

该报告被分为三个部分。在第一部分详细介绍了英国的深层地热资源,以及如何以及在何处可以利用它们;第二部分着重介绍了欧洲大陆的经验 and 使地热产业得以发展的政策;第三部分推动英国地热发展从目前的初级阶段到成熟技术,并得到广泛利益相关者、最终用户和投资者支持的关键政策和监管行动。

关于征集《地埋管地源热泵耦合太阳能跨季节土壤储热系统技术规程》标准参编单位的通知,主要包括地热能为传统的供暖和发电提供了一种本土的、低碳的和绿色的替代能源。估计热潜力 $328 \times 10^{18} \text{ J}_\text{th}$ 和功率潜力 2280 兆瓦,这些地热资源在英国可提供大约 100 年的热量,为英国提供相当于 85% 的苏格兰和 9% 的英格兰的电力需求。

地热能每天保证 24 小时供应,一年 365 天可提供广泛使用,除了承担基础负荷热(和电力),还可以利用余热和非采暖季储热。因此,利用地热资源对英国的脱碳计划做出重大贡献。“深地热”没有严格的定义,英国政府采用了这个术语来指

来自 >500 米深度的热资源,地下温度约为 25℃,在 1000 米、3000 米和 5000 米处分别增加到 39℃、89℃ 和 139℃。虽然这些温度(归类为低焓能源),低于传统(汽轮机)发电(>160℃)的经济阈值,但可以直接利用,如未建筑采暖,以及各种密集型工业过程和农业应用提供热量。在传统系统中,热源通过地下水输送,在深层含水层中循环。它是通过所谓的“双态系统”开发的,该系统由两个深钻孔(钻到 5 公里或更深的深度)组成:一个用于提取热水,另一个用于注入深含水层系统。

在英国大陆许多地方,可以提供地热资源,与热量需求高的地区相吻合;对英国的许多地区来说,利用地区能源计划开发地热资源,进行建筑供暖在技术上是可行的。在英国中高焓地热资源的潜力取决于地质构造特征,如放射性花岗岩存在导致热流增加的地区(如康沃尔、英格兰北部和苏格兰)。虽然经济可钻井深度(目前约 5 公里)的温度足够高(>200℃),可以采用双循环发电技术,或为工业生产和住宅(直接使用)供热。但如果钻遇到花岗岩地层,地层构造特点不是自然多孔的(通常为 <1% 的孔隙度)或少水,就需要进行相应的人工裂隙再造。

一般情况下,热量通过向系统注入水并通过两个深钻孔之间的岩石自然裂缝或工程通道循环来提取。据英国的地热资源条件估算,地热工程系统(EGS)大约是直接使用(水热液)系统的 700 倍。尽管有如此巨大的可用性,在英国的干热岩地热资源还没有得到有效的开发。尽管两个 EGS

项目——美国丘陵深地热项目(UDDGP)和伊甸园地热项目——结合投资约4000万英镑,正在开发的过程中在康沃尔的两个站。在法国、荷兰和德国等其他欧洲国家,它们具有类似的地热潜力,地热能对能源组合脱碳的贡献越来越大。除了每年节省可观的排放(例如德国:2017年>170万吨二氧化碳),地热产业还提供了相当大的经济刺激(例如德国:2000年以来的133亿欧元),并有助于创造工

作机会(德国:>22000个工作岗位)。

这些国家的经验表明,地热开发的成功与各国政府通过政策、法规、激励措施和倡议,以及支持不断支持技术创新的承诺有着密切相关。这种成功也与能提供一个长期、稳定的监管框架和国家分担经济风险的意愿有关,其措施需要与地热市场的成熟度保持一致。

蔚然 整改

更好推进深地资源开发利用

——访全国人大代表、中国工程院院士袁亮

中国可再生能源学会地热能专委会

筹建国家重点实验室,加强地球深部结构、物质组成与循环、能量传输机制等基础科学研究,进而形成“科学—技术—产业”协同创新链。

埋藏在地球深层的地质资源,俗称深地资源。其主要包括矿物资源、油气资源、地热能和水资源等。深地资源的探测、评价和利用,对保障国家安全、推进“双碳”目标实现、促进经济社会高质量发展具有至关重要的战略意义。如何汇集科研力量,更好地开发深地资源?全国两会期间,中能传媒记者专访了全国人大代表、中国工程院院士、安徽理工大学校长袁亮。

中能传媒:请您谈谈当前我国深地资源开发有哪些潜力?开发深地资源对保障我国能源安全有何重要意义?

袁亮:向地球深部进军是必须解决的战略科技问题。目前,我国拥有约72亿立方米的关闭矿井地下空间、1.4亿立方米的盐穴、340亿平方米的孔隙型咸水层等丰富的深地资源,亟待开发利用。尽管我国在深地探测、资源开发及空间利用等方面取得了显著进展,但与全球领先水平相比,仍存

在一定差距。深地资源在高精探测、资源开发、能源储备、碳封存、国防科技及生物医学等战略领域的价值,尚未得到充分释放。基于深地环境具备振动噪声低、电磁干扰小的“超静、超净”地球物理场观测优势和“大垂高、大空间”的条件,筹建国家重点实验室,打造深地科学研究“国家队”,加强地球深部结构、物质组成与循环、能量传输机制等基础科学研究,进而形成“科学—技术—产业”协同创新链,对推动我国深地探测、资源保障、国家安全与可持续发展具有重要意义。

中能传媒:安徽省作为我国重要的能源和矿产资源大省,其在深地空间和资源的综合开发与利用方面有哪些优势?

袁亮:安徽省不仅拥有丰富的煤炭、天然气等矿产资源,还在矿业开发、地下水资源利用、煤层气开发等领域积累了丰富的实践经验。近年来,安徽省通过实施一系列政策措施,构建支持全面创新的体制机制,优化科技资源结构,已拥有一批实力雄厚的中央驻皖高校、地方特色高校、科研机构 and 23个全国重点实验室(含筹建)。此外,安徽

省地处长三角与中部地区的交界地带,与周边省份紧密相连,区域协同效应明显,科技创新资源丰富,产业基础坚实。在安徽省牵头筹建深地国家实验室,可以有效整合长三角区域和华东地区的科研力量,形成“地面—深地”联动,巩固我国在深地科学领域的全球领先地位,并为国家安全、资源开发与生命科学提供跨学科支撑平台。

中能传媒:您认为,在深地资源的开发利用上,可以从哪些方面着手和努力?

袁亮:一是支持深地国家实验室的筹建,加强深地科学研究的基础理论研究。建议由国家发展改革委、科技部牵头,将深地国家实验室纳入国家实验室建设序列,聚焦深地能源资源探测评估、开发、储能储碳、生物医学等四大方向科学研究。围绕深地能源资源探测、开发、利用等领域开展深地科学基础研究,打造国际一流的深地科研平台,推动深地科技跨学科创新,开展深地空间国防安全应用研究,探索“平战结合”的开发模式,进一步提高国家能源安全保障能力。

二是构建政产学研用协同机制,形成长三角深地科技网络。建议通过国家科研计划和专项基金,加大对深地国家实验室建设的资金支持,设立“深地资源创新基金”,并由国家能源局牵头制定深地资源开发的技术标准与生态保护规范。以安徽省为核心,联合江苏、浙江等省份共同建设“长三角深地科学技术联盟”,推动高校、科研

院所、企业深度合作,为我国深地技术创新提供强力支撑,推动我国深地资源开发技术不断迈向国际领先水平。

三是加大基础研究与人才支持力度,推动深地科学研究创新。将深地科学研究纳入国家重点研发计划,并积极支持大型物理模拟设施、深地数字孪生平台的建设。通过政策支持,鼓励高校增设“深地科学与工程”交叉学科,推动校企联合培养、国际顶尖团队引进等方式,吸引全球顶尖科研人才参与深地科学研究。依托深地国家实验室,建立深地资源领域的人才培养基地,进一步加强深地科学的基础研究与应用研究。通过持续的人才积累,培养具有国际竞争力的高端科研团队,提升我国在深地科技领域的自主创新能力,为全球深地资源开发与利用贡献中国智慧、中国力量。

四是制定深地资源开发中长期规划,统筹深地资源开发。建议尽快制定深地资源开发利用的中长期规划,明确战略目标与重点领域,通过科学规划深地资源的勘探、开发和保护,形成系统化、规范化的资源管理与开发体系。加强对深地资源的区域性、分级化开发,推动深地能源与资源的高效合理利用,减少资源浪费并保障能源安全。同时,统筹资源开发与生态保护的平衡,确保可持续发展,抢占深地科技的制高点,增强我国在全球深地资源领域竞争中的优势地位。

信息来源:中国电力报

地热供暖面积超千万平方米总投资近30亿

地热加APP 报

能源是经济社会发展的基础支撑,也是扩投资稳增长的新增长极,地热项目涵盖应用场景多,经济效益、社会效益和生态效益一举多得。去年以来,德州市出让的52个地热矿业权,地热开发利用提速提效,建成后将新增供暖面积1500万平方米。

2025年,德州市将推进陵城、禹城、乐陵、宁津4个燃煤锅炉清洁能源替代项目,重点推进武城县制地热替代、平原县西部城区清洁热源替代等8个项目以及市区2个浅层地温能供暖(制冷)项目。庆云县第二热源项目正在全力推进实施中。该项目总投资5.4亿元,总设计供热能力370万平方米,建成后地热供暖面积将占整个庆云县的百分之80%。项目全部建成后,每年将减少煤炭消耗8.7万吨、二氧化碳减排15.4万吨。通过德州市推出的“五案合一”地热资源开发利用“一件事”改革,审批流程过去起码要半年的时间,现在只用了一个半月就完成。

所谓“五案合一”,就是将地热开发利用行政审批所分别需要编制的《地热开发利用方案》《矿山地质环境保护与恢复治理方案》《地热绿色矿山建设方案》《地热尾水回灌方案》《水资源论证方案》五个单一方案合并编制为一个《地热开发利用综合方案》,同时探索地热矿业权审批“方案同步编制、同步审查、项目同步验收”,“采矿许可证与取水许可证并联审批”的“三同一并”模式。

德州市自然资源局局长杨洪利介绍,今年德州市将发挥地热资源优势 and 装备产业优势,全力招引上游技术装备研发制造、下游人工智能运维、大数据分析的研发制造企业、国内地热勘查头部企业进入德州市场,培育打造地热清洁能源产业集聚示范园区。强化监管,提升地热资源规范化

管理水平。因地制宜探索“地热+”应用,提升地热能开发利用水平。对市政供热管网覆盖不到的农村社区,优先考虑地热供暖,保障群众取暖需求。

记者从德州市自然资源局了解到,今年德州市重点推进6个供暖面积超百万地热能开发利用项目,涉及15个矿业权规划区块,总面积88.05平方公里,总投资近30亿元,新增供热面积约1500万平方米。

1.陵城区燃煤锅炉替代项目

该项目由2个采矿权规划区块组成,总面积13.02平方公里,项目建设单位为陵城区鑫德供热管理有限公司,总投资约4.1亿元,规划地热能建设总供热能力200万平方米。拟建设中深层集中供热热源站3处,中深层地热井48眼。

2.武城县城区供暖新能源替代项目

该项目由2个采矿权规划区块组成,总面积16.27平方公里,项目建设单位为武城县弘源热力有限公司,总投资约7.52亿元,规划总供热能力440万平方米,建设内容包括能源站建设工程和厂外配套建设工程。拟建设中深层集中供热热源站1处及屋面光伏发电系统1套,分布式能源站2处,浅层地源热泵能源站1处,中深层地热井62眼,浅层地热地埋管3000眼,及其他配套设施设备,分两期建设。

3.平原县西部城区清洁热源替代工程项目

该项目由3个探矿权规划区块组成,总面积25.9平方公里,项目建设单位为山东地矿舜景地热开发有限公司,总投资5亿元,规划总供暖面积200万平方米,配套建设深层地热井54口(25采29灌),项目采用“中深层地热+水源热泵机组”技术,升级现有余热回收利用系统、智慧供热系统,提标

改造社区换热站90座、能源站2座等配套基础设施,为平原县西部城区提供清洁供热服务。

4. 夏津县中深层地热综合应用示范项目

该项目由2个采矿权规划区块组成,总面积2.6平方公里,项目建设单位为夏津尚和绿建新能源产业有限公司,总投资1.5亿元,配套建设深层地热井13口(6采7灌)。项目建成后,综合能源站供热能力100万平方米,共计为22个小区或单位提供冬季供热服务。

5. 山东有研半导体材料有限公司片区项目

该项目由1个采矿权规划区块组成,总面积8.18平方公里,项目建设单位为德州天衢热力有限公司,总投资约3.8亿元,配套建设深层地热井18口(8采10灌),规划总供热面积210万平方米,拟采用“中深层地热能+水源热泵”模式,对太阳能小镇、金街云谷、中元科技等单位进行供热。

6. 庆云县第二热源项目该项目由2个探矿权和3个采矿权规划区块组成,总面积22.08平方公里,项目建设单位为山东益安新能源发展有限公司,分南北两个片区,总投资5.4亿元,建设开采井48眼,回灌井48眼,能源站4处及其配套设施,分两期建设,实现供暖面积320万平方米。

作为一种绿色低碳、清洁高效的可再生能源,地热能的开发利用对创新供暖发展模式、持续优化能源结构、推动我市高质量发展有着重要意义。2024年,德州市积极践行“双碳”理念,扎实推动绿色低碳发展,地热开发创出德州经验。112个地热矿山纳入省级绿色矿山名录,全省最多;在全国率先探索地热资源开发“五案合一”改革,形成16个典型案例;年内全市出让52个地热矿业权,数量全省第一,实现出让收入3566万元;地热能产业链入选全市标志性产业链。

冰岛与波兰共建绿色能源标杆

地热能资讯

近日,冰岛和波兰启动了地热协同项目,旨在促进两国之间强大的地热伙伴关系。该项目由欧洲经济区金融机制(FM EEA)和挪威资助计划(Norway Grants)提供资金,强调了国际合作在实现可持续能源目标方面的价值。通过将波兰尚未开发的地热能潜力与冰岛数十年的专业知识相结合,该项目将为更绿色、更具韧性的能源发展铺平道路。

欧洲经济区金融机制由冰岛、列支敦士登和挪威共同运营,助力欧洲可再生能源项目顺利开展。该项目与协议的总体目标一致,即弥合参与国之间的知识、技术和基础设施差距。这标志着朝实现《欧洲绿色协议》中规定的欧洲气候目标迈出了重要一步。

波兰拥有丰富的地热资源,主要是低温地热资源,适合区域供暖、沐浴和工业过程等直接应用场景。然而,有限的基础设施和监管障碍阻碍了资源充分开发。相比之下,冰岛已成为全球地热

能的领导者。冰岛拥有先进的地热系统,支持其90%的集中供暖,并贡献了30%的发电量,堪称高效利用该可再生能源的典范。

然而,与冰岛相比,波兰的地热资源发展情况有待提高。截至2022年底,波兰运营了10套地热区域供热系统,总装机容量为123.4MW,自2019年以来增长了26%。包括热泵在内的浅层地热技术也得到了显著发展,到2022年,装机容量将超过900 MW。

欧洲经济区协议让波兰有机会借鉴冰岛的专业技术,促进可持续发展和相互学习。尽管地热资源开发取得了进展,但地热能在波兰能源结构中的份额仍然微乎其微。基础设施有限、初期投资成本高和监管严苛等挑战阻碍了进一步的发展。与此同时,冰岛已成为全球地热能领域的佼佼者。冰岛的地热资源支持着90%的集中供暖,并贡献了30%的电力生产,这表明这些资源不仅得到了有效利用,同时具有一定的发展潜力。