

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-739-04

# “双碳”目标下有机工质地热能热电联供系统浅析

王默晗 孙文龙 李 瑛

(山东科技大学储能技术学院 青岛 266590)

**【摘要】** 在传统能源逐渐短缺、环境污染日益严重的情况下,“双碳”目标的提出具有重要的意义,可再生能源开发利用具有广阔的前景。现如今,利用有机工质作为循环介质是最常用的一种地热发电方式,通过清洁的有机工质进行换热不仅成本低,而且换热性能很强,能够很好的利用地下热水的热量。利用地热能设计的热电联供系统比传统发电系统节省占地面积小,同时此系统对环境保护有很大益处,与火力发电相比,使用地热资源发电能够很好的节省燃料同时减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等废气的排放,对于推进实现“碳达峰”、“碳中和”具有重要意义。

**【关键词】** 地热能; 有机工质; 朗肯循环

中图分类号 TM616 文献标志码 A

## Analysis of Organic Working Substance Geothermal Energy Combined Cooling Heating and Power System under the Target of “Double Carbon”

Wang Mohan Sun Wenlong Li Ying

(College of Shandong University of Science and Technology energy storage technology, Qingdao, 266590)

**【Abstract】** In the case of gradual shortage of traditional energy and increasingly serious environmental pollution, the proposal of the ‘dual carbon’ target is of great significance, and the development and utilization of renewable energy has broad prospects. Nowadays, the use of organic working medium as a circulating medium is the most commonly used geothermal power generation method. Heat transfer through clean organic working medium is not only low cost, but also has strong heat transfer performance, which can make good use of the heat of underground hot water. In budget and covers an area of land than the traditional power generation system. In terms of environment, this system is of great benefit to environmental protection. Compared with thermal power generation, the use of geothermal resources for power generation can save fuel and reduce emissions of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and other exhaust gases, which is of great significance for promoting the realization of ‘carbon emissions peak’ and ‘carbon neutrality’.

**【Keywords】** Geothermal energy; Organic working medium; Rankine cycle

## 0 引言

“十三五”发展规划以来,我国地热源行业的应用取得了显著发展。截至 2020 年年底,我国地热能直接利用规模达 40.6 兆瓦,全球占比 38%,连续多年位居世界首位。我国地热能供热、制冷面积累计达 13.9 亿平方米,近 5 年年均增长率约

23%。在北方地区冬季清洁取暖推广中,地热能供暖已经扮演了重要角色,一些城市新区、县城利用地热能已实现 100%清洁供暖。尽管如此,我国地热能还是没有“热”起来。与风能和太阳能相比,地热能依然是小众能源。《“十四五”可再生能源发展规划》提出,积极推进地热能规模化开发,积

基金项目: 山东科技大学 2021 年度在线课程建设 (Z XK2021032); 双碳背景下多学科交叉融合能源动力类应用型人才培养模式研究与实践, 2022 年度山东省本科教学改革研究项目面上项目 (M2022263); “双碳”战略指引下多学科交叉融合的储能科学与工程应用型人才模式构建, 山东省本科教学改革研究项目 (M2023040)

作者 (通讯作者) 简介: 王默晗 (1970.06-), 女, 硕士研究生, E-mail: 1393854059@qq.com

收稿日期: 2024-02-29

极推进中深层地热能供暖制冷,全面推进浅层地热能开发,有序推动地热能发电发展。《关于促进地热能开发利用的若干意见》中明确指出,到2025年,地热能供暖(制冷)面积比2020年增加50%,全国地热能发电装机容量比2020年翻一番。我国地热发电探索起步不算晚,但近30年来发展缓慢,在世界各国中处于较为落后的局面,地热发电装机容量世界排名第15位,年发电量排在世界第14位。从地热发电基础理论和设备装配角度看,我国发电技术水平已相当成熟<sup>[1]</sup>。从资源储量角度分析:我国已发现地热源3200多处,其中具备高温地热发电潜力有255处,预计可获发电装机5800MW;干热岩蕴藏热能量巨大,我国大陆3000米至10000米深处干热岩资源总计为 $2.5 \times 10^{25}$ J,相当于860万亿吨标准煤,是我国目前年度能源消耗总量的26万倍;我国中低温地热资源丰富,在东南沿海、华北等地具有很好的中低温地热发电前景,目前地热开发利用量不到资源保有量的千分之一,总体资源保证程度相当好<sup>[2]</sup>。

## 1 有机工质地热能发电在国内外发展及研究现状

冰岛、美国等国家都蕴藏着丰富的地热资源,据地质调查表明,美国高温地热发电潜力相当于755-7297亿吨标准煤,或600-4750亿桶石油;可以直接利用的中、低温地热能则相当于1606-9139亿吨标准煤。此外,日本、新西兰、意大利、前苏联、印度、菲律宾、法国、匈牙利、墨西哥、肯尼亚等许多国家都蕴藏着地热资源。1904年,意大利建立了第一个能够利用地热蒸汽生产电力设备;1913年,第一座装机地热电站在意大利建成并运行,标志着商业性地热发电的开端;1960年,美国加利福尼亚的盖瑟尔斯地热电站利用地热干蒸汽生产出商业电能;2008年6月,法国的苏尔苏斯发世界上第一套增强地热系统地热发电装置投入商业运行;2011年,瑞士城市巴塞爾首座使用干热岩技术发电的商用地热发电站建成。现如今,菲律宾国家石油公司的能源开发公司拥有1202MW地热发电装机容量,占全国地热发电60%的份额,主要运作莱特岛世界最大的唐古纳湿蒸汽地热田,唐古纳地热电站总装机容量为708MW,分为5个厂区,其中的马利博格厂是世界上最大的

湿蒸汽地热电站,总装机容量 $3 \times 77.5$ MW,即232.5MW;而马席奥厂是世界最大的有机工质地热电站,总装机容量为125MW,利用奥玛特的双工质发电机组群排列出巨大阵容<sup>[3]</sup>。

我国的地热资源也比较丰富<sup>[4]</sup>。目前已发现的地热露头有2700多处,我国拥有 $150^{\circ}\text{C}$ 以上高温水热系统的温泉区近百处,20世纪70年代后期,我国开始利用高温地热资源发电,先后在西藏羊八井、郎久建设工业性地热发电站,总装机容量28.18MW。其中羊八井地热电站装机容量25.18MW,利用每年 $1.095 \times 10^7 \text{m}^3$ 流量、温度 $130 \sim 170^{\circ}\text{C}$ 的水蒸汽,实际发电稳定在18.5MW,约占拉萨电网全年供电量的40%,冬季超过60%。除西藏外,云南和台湾省属高温地热区;福建、广东等沿海省份属中、低温地热带;如图1所示为我国常规地热资源分布。

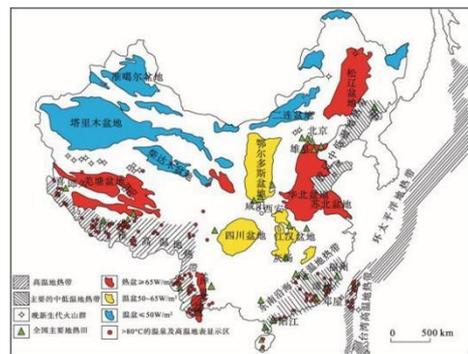


图1 我国常规地热资源分布

Fig.1 Distribution of conventional geothermal resources in China

20世纪70年代,我国先后在广东、江西、湖南、广西、山东、辽宁、河北等地共建成7处、利用 $100^{\circ}\text{C}$ 以下中低温地热流体发电的小型地热试验电站。1970年广东丰顺县邓屋,利用 $92^{\circ}\text{C}$ 地下热流体采用闪蒸法发电试验成功,当时的地质部部长李四光先生还发去了贺电。首次发电装机容量为86kW。1978年采用有机工质质法的第二台试验机组发电量为200kW。1984年第三台300kW机组投入生产。1971年在江西宜春县建立的温汤地热试验发电站(2台机组装机容量100kW),是世界上因地制宜利用中低温地热水发电的范例。河北怀来县后郝窑,利用 $85^{\circ}\text{C}$ 的地热流体建立发电站,也是采用有机工质发电系统,工质为氯乙烷,装机容量为200kW。辽宁营口市熊岳地热试验电站,热

水温度 84℃, 采用正丁烷作为双循环发电系统的工质, 装机容量为 200kW。

我国的地热资源非常丰富<sup>[2]</sup>, 资源总量约占全球的 7.9%, 可采储量相当于 4626.5 亿吨标准煤, 主要以中低温地热资源为主。其中, 温度大于 150℃ 高温地热资源主要分布在藏南、滇西、川西以及台湾省; 中低温地热资源主要分布于松辽平原、黄淮海平原、江汉平原、山东半岛和东南沿海等地区。

## 2 有机工质地热能热电联供系统初步设计

地热能热电联供系统是利用地热水加热有机工质 R134a 产生蒸汽来推动汽轮机做功发电, 利用地源热水余热进行供热。热电联供这种发电方式的优点是效率高, 系统构成简单; 通流面积较小, 透平尺寸小; 可实现远程控制, 运行成本很低; 单机容量范围广; 系统部件、设备可实现标准模块化生产, 降低制造成本。

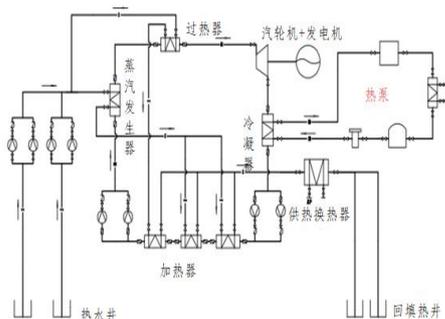


图 2 小型地热能热电联供系统简图

Fig.2 Schematic diagram of small geothermal cogeneration system

如图 2 所示, 地源热水首先进入蒸汽发生器中与有机工质 R134a 进行热交换使有机工质变成过热蒸汽, 过热蒸汽在过热器中再次提升过热度, 达到温度要求的过热蒸汽进入螺杆膨胀机中膨胀做功, 过热蒸汽在螺杆膨胀机中做功后输出的乏汽进入凝汽器中放热, 为充分利用有机工质乏汽的热量, 因此在凝汽器位置设置一个热泵循环将有机工质乏汽中的低温余热利用起来。设置的热泵系统包括蒸发器、压缩机、冷凝器、储液罐、过滤器和膨胀阀五个设备, 其中热电联供系统中的冷凝器与热泵系统中的蒸发器共用一个设备, 也就是说热电联供的冷凝器恰好可作为热泵系统的蒸发器, 从而达到热电联供系统乏汽冷却的作用。在热泵系统中,

压缩机排出的高温高压的制冷剂蒸汽流向保温水箱里的冷凝器, 将热量传给冷却水, 然后制冷剂通过膨胀阀节流降压, 在热泵系统的蒸发器中蒸发吸热, 吸收热电联供系统中螺杆膨胀机排出乏汽中的热量。热电联供主循环过程中经过冷凝器的有机工质蒸汽通过三个加热器和工质泵后再次进入蒸汽发生器重新进行一个全新的循环过程。

## 3 有机工质地热能热电联供系统优势及创新

传统的热电联供系统具有经济性高、节能的特点, 但传统热电联产系统的燃料仍然是化石燃料, 没有过多考虑二氧化碳排放造成的环境影响。

本文研究的有机工质地热发电系统, 所采用的循环方式是目前常用的朗肯循环<sup>[5]</sup>。对于本系统来说, 该系统发电的优越性比其他大部分发电系统都要好。首先, 与传统热电联供相比, 利用地热能发电不需要庞大的锅炉设备, 不需要化石燃料的燃烧以及 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等废气零排放, 既节约了资源同时也保护了环境, 在如今双碳目标下, 充分利用可再生资源无疑对推进“碳达峰”、“碳中和”具有深远意义。其次, 相比用水作为工质, 有机工质的优势有五: 一是有机工质的汽化潜热比水小很多, 因此汽轮机低压缸乏汽的排汽温度和压力相同的条件下, 与水循环相比, 有机工质的排汽焓降低, 乏汽余热的排放量减少, 冷却系统相对小; 二是有机工质沸点较低, 给予较低品位的能量, 就可以沸腾变为做功的过热蒸汽, 因此可以利用地热源作为热源; 三是有机工质凝固点较低, 可以在较低温度下释放出能量, 在寒冷天气可增加出力, 冷凝器也不需要增加防冻设施; 四是由于有机工质本身的热物理性质, 该地热能发电系统的工作压力相对低, 对设备的性能要求也低; 五是有机工质基本都是等熵工质或干流体, 不会有液滴在高速情况下对透平机械的叶片造成冲击损害, 也不会腐蚀透平机械。有机工质循环的局限性在于: 有机工质由于本身的热物理性质, 基本只适合中低温热源发电; 成本较水工质高; 由于焓差变化比水小, 发电量相同的情况下, 所需有机工质的流量比水的流量多。因此截止目前, 有机工质地热发电厂还没有实现大型化。

本文研究的创新点是在热电联供循环系统中增加了辅助热泵循环系统, 其中热电联供系统实现

了能量的梯级利用；辅助热泵循环系统实现了对余热的利用。总之，有机工质地热能热电联供系统的社会效益非常可观，对环境、社会等有非常大的益处。

#### 4 结论

我国大部分地区冬季需要采暖，夏季需要制冷。大量的空调用电使得夏季电负荷远远超过冬季，一方面给电网带来巨大的压力，另一方面造成冬季发电设施大量闲置，发电设备和输配设施利用率降低。采用地热能热电联供系统，减少夏季电空调的电负荷，同时该系统所发电也可以降低大电网的供电压力。

在“双碳”目标的影响下，热电联供系统将成一种主要的供能方式，能够在提供人类所需的能量之外，又能够做到环境友好而不消耗一次能源污染环境。根据发达国家的发展经验，分布式能源是我国未来一定时期的重要能源供应系统，按照我国的发展规划，以地热能能源的热电联供系统比例可达到能源系统总量的 3-5%，将作为集中能源供应系统的重要补充<sup>[6]</sup>。

本文以 R134a 为有机工质的地热能热电联供系统，即无污染也不会产生影响空气质量的有害气体。当今社会，一次能源的消耗已经严重影响全球气候环境，因此使用清洁能源地热能既能作为供能能源的同时，又能起到保护环境的作用。

#### 参考文献：

- [1] 贾建平.基于可再生能源的发电技术及应用研究[M].成都:中国水利水电出版社,2019.
  - [2] 刁谦,牛树银,孙爱群,等.中国东部地热资源开发潜力与建议[J].河北地质大学学报,2019,42(5):1-8.
  - [3] 中国石油新闻中心.地热能有望“热”起来[J].天然气勘探与开发,2023,46(1):96.
  - [4] 孟祥睿,马新灵.有机朗肯循环低品位热能发电技术[M].郑州:河南科学技术出版社,2015.
  - [5] 蒋润花,李洪强,尹辉斌,等.冷热电联供系统多目标评估与运行策略研究[J].工程热物理学报,2019,40(5):1016-1024.
  - [6] 李垒,陶乐仁,张姗.有机朗肯循环发电系统中换热过程模拟与系统经济性分析[J].制冷与空调,2020,20(5):22-27
- 
- (上接第 725 页)
- (3)应重视工艺专业与仪控专业之间的配合，以及设计院与供货商之间的协同工作。应确保各专业之间，以及与供货商之间的接口清晰明确且不遗漏不重叠。设计院应对设备采购人员、供货商进行必要的技术交底，以确保技术信息完整，技术要求理解一致，最大限度的减少或者避免技术文件在执行中的偏差。
- 参考文献：**
- [1] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
  - [2] GB 50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
  - [3] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:195.
  - [4] 中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施:暖通空调·动力[M].北京:中国计划出版社,2009.
  - [5] 彦启森,石文星,田长青.空气调节用制冷技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:172-182.
  - [6] 精密空调回风温度、送风温度及压差控制分析白皮书[J].UPS 应用,2016,(7):42-48.
  - [7] 陈红军.某核电站主控室空调系统设计改进及应用[J].暖通空调,2021,51(1):42-45.