

地热能及与其他新能源联合发电综述

李克勋¹, 宗明珠¹, 魏高升²

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市 津南区 300350;

2. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Overview of Geothermal Power Generation and Joint Power Generation With Other New Energy Sources

LI Kexun¹, ZONG Mingzhu¹, WEI Gaosheng²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Jinnan District, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 我国地热资源丰富, 且分布范围广。随着能源短缺和环境恶化问题的出现, 地热能作为一种可再生的清洁能源受到人们的广泛关注, 并将其用于发电领域, 以降低污染物的排放、减缓煤炭等化石燃料引发的温室效应, 实现能源结构的优化。介绍了地热蒸汽发电技术、地热水发电技术、干热岩发电技术、岩浆发电技术等地热发电技术的工作原理, 并在适用范围、发电效率、发电成本、优缺点等方面对其进行比较。同时, 阐述了地热与太阳能、生物质联合发电技术; 分析了地热发电技术中存在的问题, 以期地为地热能在我国乃至世界范围的实际应用提供参考。

关键词: 地热能发电; 太阳能; 生物质能; 联合发电

ABSTRACT: Geothermal resources are abundant and widely distributed in China. With the emergence of energy shortage and environmental deterioration, geothermal energy, as a renewable and clean energy source, has been widely focused and used in power generation to reduce the emission of pollutants, mitigate the greenhouse effect caused by fossil fuels such as coal and realize the optimization of energy structure. This paper introduced the working principle of geothermal steam power generation technology, geothermal hydropower generation technology, dry heat rock power generation technology and magma power generation technology, and compared them in terms of scope of application, power generation efficiency, power generation cost, advantages and disadvantages, etc. In addition, joint power generation technology with solar power and biomass power was suggested, the problems of geothermal power generation were points out, in order to provide a theoretical basis for the practical application of geothermal energy in China and even in the world.

KEY WORDS: geothermal power generation; solar energy; biomass energy; joint power generation

0 引言

自工业革命以来, 人们大力发展工业生产, 开发利用化石燃料(煤、石油、天然气), 能源消耗急剧增加, 伴随着能源短缺、环境污染等一系列问题^[1-2]。积极探索、开发、利用新能源(如太阳能、风能、核能和地热能等), 提高可再生能源利用比重, 已成为世界各国发展的必然趋势。

地热能因具有热效率高、稳定性好、用地少、生态效应小^[3]等优点, 受到各国重视。同时相对于风能、太阳能等能源, 地热能是唯一不受天气、季节变化影响的可再生能源, 自 1812 年意大利首次利用后, 在发电领域一直发挥着重要作用。尽管地热能在地理上分布不均, 但在很多国家地热能潜力巨大, 据地热协会估计, 到 2021 年全球地热发电装机容量可达 1 840 万 kW 左右^[4]。我国地热资源较为丰富, 水热型地热资源量折合标准煤 12 500 亿 t, 干热岩远景资源量折合标准煤 856 万亿 t。目前我国地热资源每年利用量折合标准煤 0.21 亿 t, 其中水热型地热资源开采率仅为 0.2%, 浅层地热能开采率仅为 2.3%, 地热资源开发利用具有良好前景^[5]。本文对地热发电技术进行综述, 以期地为地热能在我国乃至世界范围的实际应用提供参考。

1 地热发电

1.1 地热发电主要方式

地热能是由矿物的放射性衰变产生并储存在地球上的热能，以蒸汽、热水、地压、干热岩和熔岩 5 种形式存在，其中主要利用形式为蒸汽和热水，干热岩的开发利用也在不断发展。在实际应用中，除用于直接供热、温泉旅游以及农业生产外，地热能发电领域也得到广泛应用。地热发电技术是指将地热能流体的热量转化为机械能，以驱动发电机产生电能的技术^[6]。该技术既能满足电力供应的需求，又可减少化石燃料的燃烧，降低碳排放，减缓全球变暖趋势。据中国能源网统计，截止到 2018 年 9 月底，全球地热发电总装机容量为 14 369 MW。其中美国位居第一，装机容量为 3 591 MW，占全球总容量的 24.9%，印度尼西亚、菲律宾居于第二、三位，各国具体装机容量情况如图 1 所示。目前，根据地热利用形式不同，可将地热发电分为地热蒸汽发电、地热水发电、干热岩发电和岩浆发电 4 种主要方式。

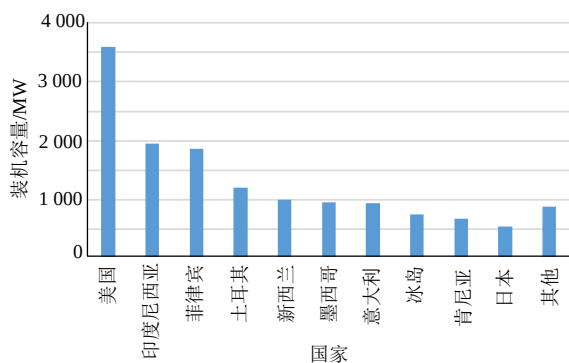


图 1 全球地热发电装机容量情况

Fig. 1 Global installed capacity of geothermal power generation

1.2 地热蒸汽发电技术

地热蒸汽发电利用蒸汽带动汽轮机做功而发电，一般利用分离器将蒸汽从汽水混合物中分离后引入汽轮机，如图 2 所示，根据实地条件也可直接利用地下干饱和蒸汽。地热蒸汽发电技术较为成熟，流程简单，运行可靠。在 2014 年的统计数据中，世界上干蒸汽的地热装机容量为 2 863 MW^[7]，对于高温干蒸汽地热资源丰富的地区，如意大利，地热蒸汽(干蒸汽)发电技术在地热发

电领域占据主导^[8]。

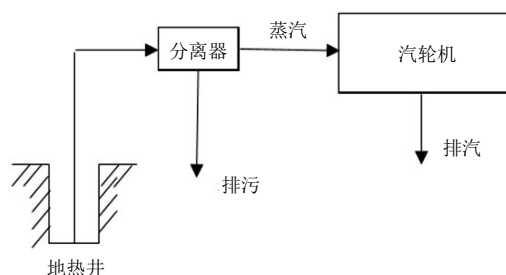


图 2 地热蒸汽发电技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geothermal steam power generation technology

1.3 地热水发电技术

地热能按照温度不同可分为高温热源(高于 150℃)、中温热源(90~150℃)和低温热源(低于 90℃)^[9]，其中地热水多属于中低温热源，以液体形式存在，无法直接进入汽轮机发电，需借助某些技术转换为蒸汽才能发电。根据采用的转换方法不同，可将地热水发电分为减压扩容法和中间工质法。

1) 减压扩容法。

利用不同压力下水的沸点不同原理，通过降低压强使地热水在密闭容器汽化为蒸汽。因其体积增加，故称为“减压扩容法”，同时此过程在瞬间实现地热水由液态到气态的转变，又称为“闪蒸法”，其工作原理如图 3(a)所示。与意大利不同，同属欧洲国家的冰岛地热资源可定义为高温湿热蒸汽资源，其地热发电几乎全部采用减压扩容(闪蒸)发电技术^[8]。在实际工艺中，地热水通过“扩容器”(或称“闪蒸器”)次数略有不同，可分为单级扩容、双级扩容和多级扩容法。截至 2014 年，全球单级扩容装机容量为 5 079 MW，双级扩容装机容量为 2 544 MW^[7]，由于多级扩容工艺较为复杂，目前尚未采用。单级扩容法结构简单，运行稳定，但地热水转换效率低，出口水温高；双级扩容法工艺流程及设备相对复杂，但系统转换效率大大提高，在相同冷热源条件下，热效率可提高 20%~30%^[9]。

2) 中间工质法。

借助低沸点(低于水的沸点)有机物(如丁烷、氟利昂等)作为中间工质，与地热水发生热交换作用而汽化，进而进入发电机做功，后经冷却系统

降温为液态,再次作为中间介质循环进入发电系统,称为“有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC)”,其工作原理如图 3(b)所示。该工艺中地热水未直接进入发电系统,而是由另外一种低沸点流体(中间工质)取代,因此又称为“双流体地热发电系统”。目前,该地热发电系统装机容量为 1 790 MW,但机组总数最多,达 286 个^[10]。与减压扩容法相似,也可分为单级、双级和多级中间工质法。其中,单级中间工质法与双级中间工质法相比,设备及流程简单,投资成本相对较低,但同样存在热效率不高的弊端(比双级低 20%左右)^[11]。另外,无论单级中间工质法还是双级中间工质法,除需定期补充中间工质外,还存在介质易燃易爆、管道泄露、威胁当地生态环境等安全隐患,因此在实际中应用较少。

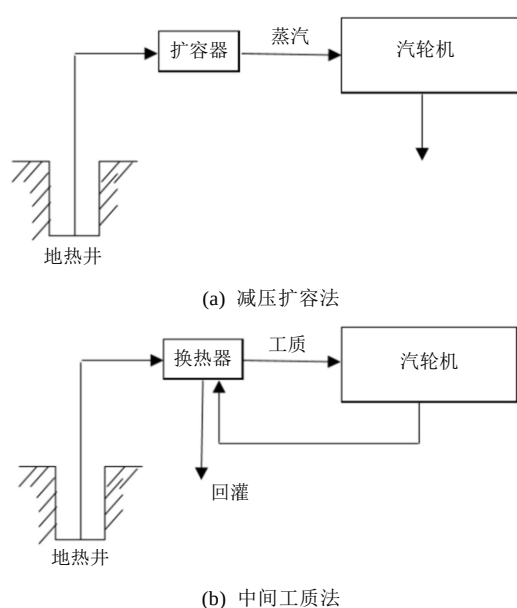


图3 地热水发电技术示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geothermal water power generation technology

近年来,有机朗肯循环系统因设备简单、适应性强等优点^[12],被广泛用于中低温地热能向电能的转化过程,并成为研究热点。其中,工作流体的选择以及系统参数的优化是 ORC 系统的关键。在地热水为 100~150℃、回灌温度不低于 70℃的条件下,以丁烷(R600)、异丁烷(R600a)、戊烷(R601)、异戊烷(R601a)和己烷 5 种烃类化合物为工质流体,发现 ORC 净输出功率随入口温度的升高先增大后减小,随冷凝温度的降低而增加,

但冷凝温度的降低使泵消耗功率增大,同时确定 R600a 对应最高净输出功率和最小涡轮尺寸系数^[13]。对于 ORC 系统,采用纯工质会限制系统性能的提高,而混合工质可实现工质与热源的良好匹配^[14]。刘强等^[15]选择非共沸混合物(异丁烷/异戊烷)(R600a/R601a)作为研究工质,探究了不同摩尔分数的混合物对净功率(输出功率与消耗功率之差)、蒸发器和冷凝器的单位功率输出面积、涡轮尺寸和涡轮成本的影响,确定最佳 R600a 的摩尔分数为 0.7~0.9。文献[16]还提出蒸发器夹点温差(pinch point temperature difference, PPTD)是影响蒸发器热工性能和经济性能的关键参数,进而影响 ORC 系统的效率和投资成本,分析了最佳夹点温度范围以及对应的单位功率输出传热面积、平均发电成本(levelized cost of electricity, LCOE)和动态投资回收期(payback period, PBP)。这些研究使得有机朗肯系统得以不断优化。

与此同时,将 CO₂ 等气体用于工质流成为地热发电的又一研究热点。周康等^[17]研究的“深岩玫瑰”地热发电系统巧妙结合超临界 CO₂ 的跨临界循环和有机工质的朗肯循环,超临界 CO₂ 为高压系统,绝热升压时温度上升,降压时温度下降,该过程中其焓值保持不变,利用超临界 CO₂ 的热力学属性,以达到提高地热发电效率的目的。另外,美国俄亥俄州立大学研究人员设计的新型地热发电站是将 CO₂ 代替部分水工质,因 CO₂ 萃取热量比水更有效,计算机模拟结果显示,该种新型同心环发电系统发电容量高达 500 MW,是美国平均地热发电容量(38 MW)的 10 倍以上^[18]。

1.4 干热岩发电技术

热岩是存在于地球深处的高温岩体,因地表缺乏降水或本身透水性差,导致 99% 的热岩周围无水或蒸汽^[19],被称作“干热岩”,其很难实现直接利用。但地热能大部分储存在岩石中,且不受限于地理位置,因此开发利用干热岩能量具有很好的发展前景与商业价值,对解决能源短缺问题至关重要。美国是最早开发干热岩的国家^[20],国际上对于干热岩的研究已有 40 余年,很多国家开展了热岩勘查开发工作,并进行试验性发电。目前,干热岩发电总装机容量达 12.2 MW,包括法

国苏尔茨、德国兰道和印希姆、澳大利亚夏宾奴及美国沙漠峰，装机容量分别为 1.5、3.0、5.0、1.0 和 1.7 MW^[21]。

干热岩发电技术又称“增强型地热发电技术 (enhanced geothermal systems, EGS)”，该技术原理如图 4 所示，一端借助压力泵将冷水注入 4~6 km 的深处，此处岩体温度可达 200℃，另一端通过管道加压将经过加热的冷水提至地面，带动汽轮机转动，实现热能向电能的转换^[22]。发电后的“废水”可再次注入地下深处，作为介质循环利用。在此发电过程中，实现最大程度的采热是关键。通常采用高压水力破碎、化学爆炸破碎、地下核能爆炸破碎等对干热岩进行人工激发，使之形成人工热储水库，便于进行热交换。其中高压水力法最为常见，其原理分为 2 种：若岩体无裂缝，高温岩石受注入水的冷缩作用而形成裂缝；若岩体本身有裂缝，注入水可使原有裂隙变宽或错位，增强裂隙间的透水性。

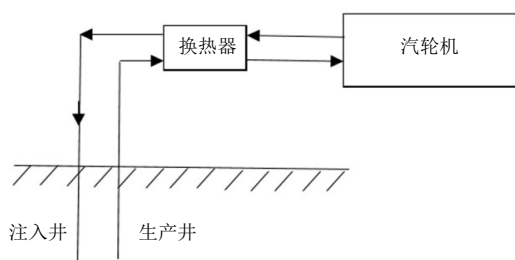


图 4 干热岩发电技术示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dry heat rock power generation technology

汪集旻等^[23]基于现有地热测量数据及相关热力学物理性质参数，对我国大陆干热岩资源进行模拟计算，结果表明，中国大陆 3~10 km 深处的干热岩资源总计 2.09×10^7 EJ，相当于 7.15×10^6 亿 t 标准煤；若仅按 2% 的比例计算可开采量，也可达到我国大陆 2010 年资源消耗总量的 4 400 倍。巨大的干热岩资源量使其在地热资源构成中占主导地位，为今后的地热开发指明方向，若能实现干热岩的规模化利用，必将解决我国资源利用与环境保护的一大难题。从资源地域分布来看，青藏高原南部资源量占总量的主要部分(20.5%)，另外华北、东南沿海、东北、云南西部均有分布^[23]，具体分布情况如图 5 所示。从资源深度分布来看，

干热岩资源量随深度增加呈现线性增长趋势^[24]，如图 6 所示，但开采难度也大大增加，这对今后的开发技术提出巨大挑战。

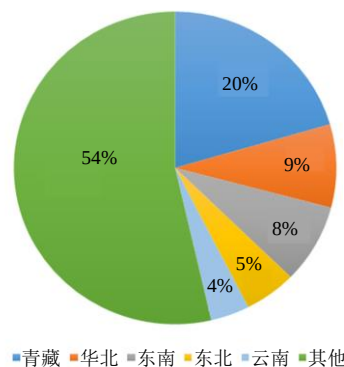


图 5 中国大陆主要干热岩分布情况

Fig. 5 Distribution of dry heat rocks in mainland China

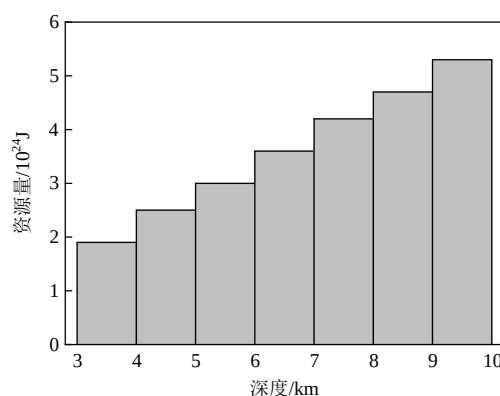


图 6 中国大陆干热岩资源深度(3~10 km)分布图

Fig. 6 Distribution of dry heat rock resources with depth (3-10 km) in mainland China

全球有 2 000 万~3 000 万口油井被废弃^[25]，虽不能进行油气开采，但井温较高，很多学者提出将其改造为地热井用于地热发电^[26-28]。其原理与干热岩发电技术相似，构造简单，将井底封死，环状部分作为注入井，中间部分作为采出井，利用流体与岩石之间的热交换进行发电，既实现“变废为宝”，又可避免钻探成本高等问题。在已有的大庆油田调查资料中，关停探井共 2 486 口，其中地层温度在 90℃ 以上的共 366 口，有些甚至达 130℃^[29]，具有一定开发利用价值。由于废弃油井获得的地热能是中、低质的来源，因此多将有机流体作为废弃油井地热发电的工作流体^[30]。Davis 等^[31]以异丁烷为工作流体，对废弃井地热发电进行了研究，发现获取最大地热能主要取决

于井底温度和注入压力。Ebrahimi 等^[28]利用有机朗肯循环对低温废弃气井进行发电优化研究,确定 R125 为合适的工作流体。在实际应用中,如何根据环境条件选择合适的工作流体和确定合适的工程参数,是提高发电效率的关键。

1.5 岩浆发电技术

岩浆是指产生于上地幔和地壳深处,含挥发分的高温黏稠熔融物,其主要成分为硅酸盐,一般温度在 900~1 200℃之间,最高可达 1 400℃,具有巨大的热量能源。据估算,仅美国就有 5 万多个岩浆活动处,所具有的能量相当于 250 亿~2 500 亿桶石油燃烧产生的热能,比美国所有矿物燃料的蕴藏量还多^[32]。岩浆的高温特性使其在发电领域具有绝对优势,但对其的实际利用只停留在理论研究。岩浆发电目前仅限于将井钻到岩浆层,直接获取热能^[33],其中钻井技术就是需要面临的一大障碍,如何真正、有效地钻到地下几千米的岩浆层有待进一步的科学研究与实践。

1.6 联合循环地热发电技术

除上述单独的发电技术外,随着科学研究的进步与工艺流程的优化,为最大程度地实现对地热能的利用,多采用 2 种及以上技术相结合的方法。自 20 世纪 90 年代中期起,各国开始将地热蒸汽发电技术与地热水发电技术相结合,设计出联合循环地热发电系统。该发电系统主要针对高温(大于 150℃)热源流体,地热蒸汽先经过汽轮机进行一次发电,出口流体在温度不低于 120℃的情况下,进入中间工质系统将热量传递给低沸点流体,进行二次发电,如图 7 所示,联合发电既提高了发电效率,又实现了排放尾水的二次利用,具有良好的经济、环境和社会效益。

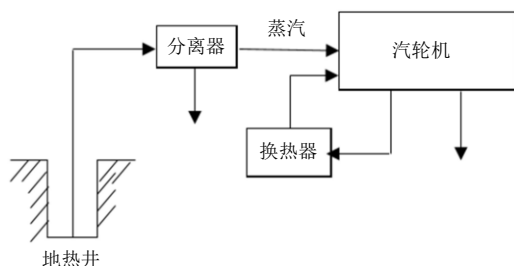


图 7 联合循环地热发电技术示意图

Fig. 7 Schematic diagram of combined cycle geothermal power generation technology

1.7 不同地热发电技术特性比较

地热蒸汽发电、地热水发电以及干热岩发电技术在适用范围、发电效率、装机容量等方面存在一定差异,如表 1^[19,22,34]所示。

表 1 地热发电技术对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of geothermal power generation technology

项目	地热蒸汽发电	减压扩容发电	中间工质发电	干热岩发电
适用范围	高温热田 ($t > 250^{\circ}\text{C}$)	中高温热田 ($130 < t < 250^{\circ}\text{C}$)	中低温热田 ($90^{\circ}\text{C} < t < 130^{\circ}\text{C}$)	高温热田
装机容量 (截至 2014 年)	2 863 MW (截至 2014 年)	7 623 MW (截至 2014 年)	1 790 MW (目前)	12.2 MW (目前)
发电效率	>20%	15%~20%	35%~50%	—
发电成本	较低	较低	较高	—
开采难度	较大	较小	较小	较大
环境影响程度	若保证回灌,影响较小	若保证回灌,影响较小	有机工质存在污染隐患	环境影响小
优势	系统结构简单,技术成熟	设备简单,易于制造	充分利用热水热量,降低发电的热水消耗率	热量高,不存在废水、废气等污染
局限	地热资源参数(温度、地压等)要求较高	设备尺寸大,易腐蚀结垢,对热水温度、矿化度要求高	增加投资和运行的复杂性	开发利用技术不成熟

作为一种较新型地热发电技术,干热岩发电技术由于开采难度较大,且技术不成熟,目前装机容量还很小。若能从根本上解决干热岩热能利用问题,必将在地热应用领域占据重要地位。而常规地热发电技术中,地热蒸汽发电技术和减压扩容发电技术装机容量较大,在电厂造价^[35]、环境影响方面优于中间工质技术,但发电效率相对偏低。中间工质法因低沸点工质的应用,发电成本增大,且存在一定环境隐患。另外地热蒸汽发电因所需温度高、埋藏较深,导致开采难度提高。

2 新兴联合发电技术

随着科学技术的进步,能源结构不断改善,太阳能、生物质能、地热能等可再生能源优势突出,比重增大,成为开发利用的研究热点。根据其形态和品位的特点,有效实现多能互补的发电方式,是提高能源利用率的有效途径^[36]。

2.1 地热与太阳能联合发电

地热发电虽具备可再生、环境友好等优点，但同时也存在一些问题与风险，例如在澳大利亚等炎热和干旱的气候条件下，日变化的温度对风冷冷凝器的运行产生不利影响，导致地热发电厂功率输出波动大和热效率的下降^[37]。为提高热能这种低品位热能的发电效率和经济效益，近几十年研究者尝试将地热能发电系统与太阳能发电系统结合，并在美国内华达州法伦镇建成世界首座太阳能地热混合电厂，其装机容量为 26 MW，可满足千户家庭的供电需求^[38]。

地热与太阳能联合发电系统主要分为两大类：以地热发电为主和以太阳能发电为主。前者是在原有的地热水发电系统的基础上增加一个太阳能集热器，对流体进行加热。目前以基于蒸汽发电的地热发电为主的系统，依据太阳能集热器位置的不同，可分为图 8(a)—(d)所示的 4 种情况：1)地热水先经集热器加热，后进入地热发电系统，该流程可提高进入汽轮机的地热水温度，并增加蒸汽含量；2)地热水先经过分离器，蒸汽直接进行发电，而分离出的热水经集热器加热后也可进入汽轮机发电；3)除对分离出的热水进行加热外，一些系统采取太阳能集热器加热蒸汽的方式，使饱和蒸汽变为过饱和，从而提高发电量。4)为实现地热水的循环利用，集热器还可置于汽轮机组之后，冷却的蒸汽经加热后与新地热水一同流经汽轮机组实现发电^[39]。对于以太阳能发电为主的系统，因地热水温度远低于太阳能集热器可达温度，仅起到加热进入太阳能集热器工质的作用，因此地热能预热器较为固定，该发电系统类型简单。

除上述直接将利用蒸汽发电的地热发电系统与太阳能发电系统联合外，研究人员现多模拟有机朗肯循环发电系统，利用地热能及太阳能双重的热量，并最终将其转换为电能。在周刚等^[40]设计的不受地理位置限制的联合发电系统中，白天载热流体经地热能加热后进入槽式太阳能集热器，对其进行二次加热，多余能量储存在储能器，并最终进入 ORC 系统将热能传递给循环工质，带动汽轮机发电机组实现发电；在夜间载热流体则

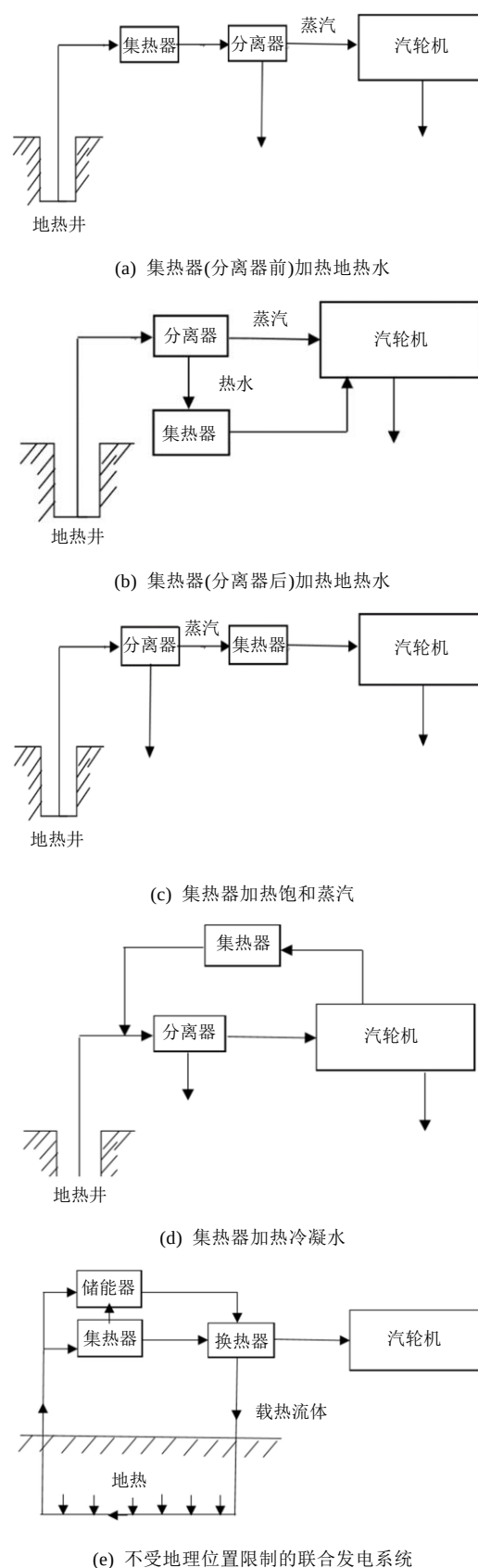


图 8 以地热为主的地热和太阳能联合发电技术示意图

Fig. 8 Schematic diagram of geothermy and solar power generation technology based on geothermy

受地热能和储能器的双重加热,大致流程如图 8(e) 所示。该系统使 2 种清洁能源很好地融合,既实现互补,又提高发电效率,是未来能源利用发展的有利方向。此外,超临界 CO_2 循环在地热与太阳能混合系统中也发挥着重要作用,有效地耦合较低温度的地热和较高温度的太阳能热,系统热效率得以提高,烟效率也比单独的太阳能热的循环系统提高了 5%~10%^[36]。

2.2 地热与生物质能联合发电

生物质能储量丰富,是世界第四大一次能源,仅次于煤、石油、天然气三大化石燃料^[41],并且与地热能、太阳能同属可再生能源。自 20 世纪 60 年代,我国先后对生物质气化发电技术、沼气发电技术、生物质燃烧发电技术进行探索并应用于实际发电工程,践行国家五年计划中“将生物质能利用技术的研究与应用列为重点科技攻关项目”的重要指示^[42]。但由于生物质存在热值小、效率低等问题,使其不适合大规模发电。

生物质能虽热量少,但温度高的优势不容忽视。赵波等^[43]提出将生物质燃气(生物质能的一种形式)与热量大、温度相对较低的中低温地热能相结合,用于联合发电,具有良好的经济可行性,并大大提高发电功率^[39]。图 9 为该联合发电系统的工作原理,生物质原料(如秸秆等)经酸化水解、厌氧发酵后生成生物质燃气,进入燃气锅炉燃烧,对已经受到地热水加热的低沸点工质进行二次加热,使之由饱和蒸汽转为过热蒸汽,随后进入发电机组实现热能-机械能-电能的转变。该系统的设计思路经热力循环性能分析和发电成本评估,结果表明发电功率可达单一地热发电系统的 4.1

倍,发电成本可随生物质能利用分数的提高而大幅度降低。

在实际应用中,全球首座地热能与生物质能联合发电厂 Cornia 2 地热发电厂已于 2015 年建成投产,该厂位于意大利托斯卡纳区,由意大利国家电力公司 Enel 旗下的绿色电力公司(EGP)投资建成。该联合发电厂可充分利用当地的森林生物质能,将地热能产生的蒸汽加热至 200℃ 以上,使发电厂发电能力提高 3 倍,并为本国能源网增加超过 3 000 万 kW·h 的低碳电力,减缓温室效应。

3 存在问题

地热发电在实际应用中受到腐蚀、结垢、回灌等问题的限制,另外在前期也存在地热资源勘查困难等问题,不利于地热能发电领域的发展。

3.1 腐蚀与结垢

腐蚀和结垢是地热能利用过程中常见的问题。因地热水中含多种离子,矿化程度高,尤其是氯离子,通过电化学反应腐蚀管道、深井泵、换热器等装置与设备^[44],其中西藏羊八井地热电厂的 16 Mn 钢板每年被腐蚀掉 13 mm 厚^[45],需投入大量资金对其进行维修以保证正常发电。现多采用涂防腐层、选择防腐材质、充氮注硫等方法减轻腐蚀现象^[44]。结垢是地热水利用过程中的另一大难题,该难题也与地热水的成分有关。在地热岩附近高温高压的环境下,地热水可溶解多种可溶性矿物质,但在提至地面的过程中,随着周围温度、压力的变化,可溶性矿物质逐渐析出并附着于管道等设备表面,形成垢层,降低地热水的流动性与换热器的传热效率。目前,常见的防垢技术包括添加化学阻垢剂、电磁场等物理除垢、涂层防垢等。

3.2 回灌

为使地热水水位正常,避免地面塌陷的发生,保证地热能的可持续开发利用,同时避免地热水中有害成分对环境的污染,地热水的回灌是十分必要的。但实际回灌过程中技术要求复杂,回灌井的位置不当以及过量回灌都会引发热储的冷却^[46],如何有效、简便地实现地热水的回灌还有待研究和探索。

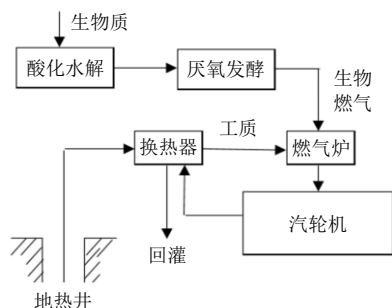


图 9 地热与生物质能联合发电技术示意图

Fig. 9 Schematic diagram of combined geothermal and biomass power generation technology

3.3 资源勘查

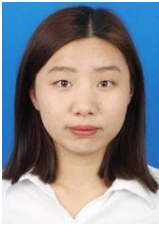
地热资源勘查是实现地热资源有效开发利用的前提，而我国目前的地热勘查技术仅处于初级水平，且很多西部地区甚至未进行过地热勘查工作，主要原因是国家缺乏有经验的技术人员，勘查专业研究未取得较好进展等^[47]。但随着《地热资源开发利用“十三五”规划》和相关政策的出台，地热资源受到广泛关注并成为热点，地热资源勘查开发利用将迎来黄金发展期^[48]。

4 结论

随着经济的发展，能源短缺问题逐渐突出，地热能作为可再生的清洁能源，受到各国研究者的广泛重视，并将其用于发电领域。现已存在地热蒸汽发电技术、地热水发电技术、干热岩发电技术等单一地热发电技术，及地热能与太阳能、生物质能等新能源的联合发电技术，并在实际工程中得以应用，大大缓解能源短缺、温室效应等资源与环境问题。但地热发电本身存在难回灌、易结垢腐蚀的问题，从而阻碍地热发电的广泛应用。燃煤发电在未来30年仍将占有较高比重，如何有效解决地热发电存在的问题，实现能源结构的优化是未来研究的方向。

参考文献

- [1] 樊东黎. 世界能源现状和未来[J]. 金属热处理, 2011, 36(10): 119-131.
- [2] 黄洁, 李虹. 地热资源及其开发利用[J]. 西部资源, 2007(2): 7-8.
- [3] Li K, Bian H, Liu C, et al. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1464-1474.
- [4] 赵宏, 伍浩松. 世界地热发电产业概况[J]. 国外核新闻, 2017(12): 18-22.
- [5] 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.
- [6] Meyers R. Encyclopedia of sustainability science and technology [M]. New York: Springer, 2012.
- [7] Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report[J]. Geothermics, 2016, 60(1): 31-43.
- [8] 汪集暘, 龚宇烈, 陆振能, 等. 从欧洲地热发展看我国地热开发利用问题[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 1-6.
- [9] 刘广林, 吕鹏飞. 简述地热发电利用形式[J]. 科技创新导报, 2013(28): 68.
- [10] Pambudi N A. Geothermal power generation in Indonesia, a country within the ring of fire: current status, future development and policy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2893-2901.
- [11] 周大吉. 地热发电简述[J]. 电力勘测设计, 2003(3): 1-6.
- [12] 张诚. 低品位余热有机朗肯循环综合性能评估与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [13] Qiang L, Duan Y, Zhen Y. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids[J]. Energy, 2013, 63(1): 123-132.
- [14] 黄靖伦, 王辉涛, 喻智锋, 等. 非共沸混合工质有机朗肯循环余热回收系统的热力性能[J]. 中国水运, 2018, 18(8): 229-230.
- [15] Liu Q, Shen A, Duan Y. Parametric optimization and performance analyses of geothermal organic Rankine cycles using R600a/R601a mixtures as working fluids [J]. Applied Energy, 2015, 148: 410-420.
- [16] Jie S, Liu Q, Duan Y. Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermo-economic performance of geothermal organic Rankine cycle systems[J]. Geothermics, 2018, 75: 249-258.
- [17] 周康, 赵国斌, Jafari H, 等. 超临界二氧化碳热动力技术应用于地热发电的研究及展望[J]. 上海节能, 2018(2): 109-113.
- [18] 美研制将二氧化碳作为工质流促进地热变电, 提高发电量近10倍[J]. 能源与环境, 2018(2): 95.
- [19] 彭第, 孙友宏, 潘殿琦. 地热发电技术及其应用前景[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 106-110.
- [20] 张二勇, 王璜, 王贵玲. 干热岩: 前景可期的新能源[J]. 紫光阁, 2018(3): 87-87.
- [21] 荆铁亚, 赵文韬, 郜时旺, 等. 干热岩地热开发实践及技术可行性研究[J]. 中外能源, 2018, 23(11): 17-22.
- [22] 高学伟, 李楠, 康慧. 地热发电技术的发展现状[J]. 电力勘测设计, 2008(3): 59-62.
- [23] 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [24] 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.
- [25] Cheng W L, Liu J, Nian Y L, et al. Enhancing geothermal power generation from abandoned oil wells with thermal reservoirs[J]. Energy, 2016, 109: 537-545.
- [26] 卜宪标, 马伟斌, 黄远峰. 应用废弃油气井获得地热能[J]. 热能动力工程, 2011, 26(5): 621-625.
- [27] Cheng W L, Li T T, Nian Y L, et al. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells[J]. Energy, 2013, 59: 248-254.
- [28] Ebrahimi M, Torshizi S E M. Optimization of power generation from a set of low-temperature abandoned gas wells, using organic Rankine cycle[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2012, 4(6): 866-872.
- [29] 张汉沛, 朱林. 关于大庆油田地热资源综合利用的几点思考[J]. 石油石化节能, 2018(2): 42-43.
- [30] Cheng W L, Li T T, Nian Y L, et al. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells[J]. Applied Energy, 2014, 118: 238-245.
- [31] Davis A P, Michaelides E E. Geothermal power production from abandoned oil wells[J]. Energy, 2009, 34(7): 866-872.
- [32] 高峰. 未来新能源: 岩浆发电[J]. 环境保护与循环经济, 2013, 33(8): 30-31.
- [33] 刘茂宇. 地热发电技术及其应用前景[J]. 中国高新区, 2018(3): 20.
- [34] 赵宏, 伍浩松. 世界地热发电产业概况[J]. 国外核新闻, 2017(12): 18-22.
- [35] 徐耀兵, 王敏, 潘军, 等. 地热资源发电技术特点及发展方向[J]. 中外能源, 2012, 17(7): 13-18.
- [36] 郑开云, 黄志强. 基于超临界 CO₂ 循环的地热与太阳能混合系统研究[J]. 新能源进展, 2018, 6(1): 62-68.
- [37] Zhou C, Doroodchi E, Moghtaderi B. An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 88-101.
- [38] 李忠东. 世界首座太阳能地热混合电厂在美建成[J]. 上海节能, 2013(1): 42-42.
- [39] 徐琼辉, 龚宇烈, 骆超, 等. 太阳能-地热能联合发电系统研究进展[J]. 新能源进展, 2016, 4(5): 404-410.
- [40] 周刚, 倪晓阳, 李金锋, 等. 不受地理位置限制的地热和太阳能联合发电系统[J]. 地球科学, 2006, 31(3): 394-398.
- [41] 于雄飞. 带你全面了解生物质发电[J]. 绿色中国, 2018, 494(4): 45-48.
- [42] 黄英超, 李文哲, 张波. 生物质能发电技术现状与展望[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(2): 270-274.
- [43] 赵波, 李达, 王恭, 等. 地热和生物质燃气联合发电系统建模与热力性能分析[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(1): 60-66.
- [44] 刘明言, 朱家玲. 地热能利用中的防腐防垢研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(5): 11-14.
- [45] 胡驰. 16Mn 在西藏羊八井地热水中的腐蚀研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 78-80.
- [46] 张金华, 魏伟, 杜东, 等. 地热资源的开发利用及可持续发展[J]. 中外能源, 2013, 18(1): 30-35.
- [47] 李兴兵, 宋祥昌. 地热勘查与新能源应用技术[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(11): 149-150, 155.
- [48] 卢予北, 李艺, 卢玮, 等. 新时代地热资源勘查开发问题研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(3): 1-8.
-
- 收稿日期:** 2019-01-25.
- 作者简介:**
- 
- 李克勋(1975), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水处理技术、电化学与新能源技术、节水技术及管理, likx@nankai.edu.cn;
- 
- 宗明珠(1995), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术应用, 本文通讯作者, zmfighting1024@163.com。
- (责任编辑 杨阳)