

# 地热发电及综合梯级利用系统

骆超, 龚宇烈, 马伟斌

中国科学院广州能源研究所可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640

**摘要** 高效利用地热资源已成为地热开发利用的焦点话题, 中国地热资源丰富, 但大多分布偏远, 地热资源利用率总体较低。本文结合国内外地热利用现状及发展趋势, 重点阐述以氨水作为工质的动力循环系统, 提出了净功率、电力产率、热效率和换热面积比率的性能指标, 并分析氨水溶液质量分数、循环倍率和热水温度对上述指标的影响。在此基础上, 探讨了建设适合于华南地域特征的地热资源综合梯级利用示范项目, 实现资源利用率达到 70% 以上, 为中低温余热利用提出了一个新的途径。

**关键词** 地热; 氨水溶液; 动力循环; 热力学; 梯级利用

中图分类号 TK529

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.008

## Geothermal Power Generation and Its Comprehensive Cascade Utilization System

LUO Chao, GONG Yulie, MA Weibin

Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract** It becomes a hot topic that geothermal resources are effectively utilized; there is rich geothermal resource located in the remote areas in China. Based on the situation and development trend of geothermal utilization, the ammonia water power cycle is introduced and the cycle performance criteria, such as net power output, net power energy per ton of geothermal water, heat efficiency, and heat exchanger area of per net power, are presented. In addition, a demonstration project of geothermal resource cascade utilization in south China area is discussed, the resource utilization rate is more than 70%. The results indicate that AWPC cycling performance could be changed by adjusting the mass fraction of the ammonia solution, a higher ammonia mass fraction solution is favorable for protecting the system from the negative pressure, and the higher mass fraction is, the higher pressure is. There is an optimal circulation ratio in AWPC system, the value is about four for the mid-low temperature geothermal resource and the corresponding mass fraction difference between concentrated solution and dilute solution is about 12%—13%. The mode exploits a new way for efficiently utilizing the mid-low temperature geothermal resource.

**Keywords** geothermal resource; ammonia water; power cycle; thermodynamic; cascade utilization

### 0 引言

地热能是蕴藏在地球内部巨大的自然能源, 已成为 21 世纪能源发展中不可忽视的可再生能源之一, 也是最现实和最具竞争力的资源之一<sup>[1]</sup>。地热能的重大优势在于其稳定性、连续性和高利用效率, 因此能在未来能源结构中发挥最重要作用, 提供稳定、连续的基础负荷。中国具有丰富的地热资源, 初步估算在 2000m 的深度范围内, 地热资源所含的热能

相当于 2500 亿 t 标准煤<sup>[2]</sup>(2010 年中国能源消费总量为 32.5 亿 t 标准煤)。因此合理开发地热资源是丰富中国未来能源的保障手段, 同时为节能减排做出突出贡献。

氨水溶液动力循环 (Ammonia Water Power Cycle, AWPC) 系统是基于 Kalina 循环提出的一种新型动力循环系统, 它简化了 Kalina 循环的冷凝换热环节, 使得系统更适用于中低温余热资源。氨水溶液动力循环中发生器和吸收器的热交换过

收稿日期: 2012-09-11; 修回日期: 2012-10-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAB12B01); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2012AA053003)

作者简介: 骆超, 助理研究员, 研究方向为中低温地热发电技术, 电子信箱: luochao@ms.giec.ac.cn; 龚宇烈 (通信作者), 副研究员, 研究方向为地热发电及综合利用技术, 电子信箱: gongyl@ms.giec.ac.cn

程是变温过程,可以与地热水形成较好的匹配,从而减少换热过程中的热损失,与有机朗肯循环相比较,具有热源、冷源与循环工质的传热匹配性好,热损失小的优点<sup>[2-4]</sup>。

与有机工质相比,氨水溶液具有以下优势:(1)氨水溶液具有变化的沸点和冷凝温度,这使得它与热源更加匹配,进而降低换热损失;(2)氨水溶液的热物性可通过改变氨水溶液浓度实现可调,该特性可实现系统性能的变化。

## 1 国内外地热利用现状及趋势

“世界地热大会(WGC2010)”阐述了全球地热利用现状和趋势,截至2009年底,全球已有24个国家建有地热电站,装机容量和年发电量分别为10715MW和672.5亿kW·h/a,未来5a发电国家可能增至34个,装机容量预计达到18.5GW<sup>[3]</sup>;全球地热直接利用装机容量和年产能分别为50583MW和 $4.38 \times 10^{14}$ kJ/a,年均增长幅度分别达到12.3%和9.9%<sup>[5]</sup>。利用浅层地热能的地源热泵在世界各国得到广泛应用,已占据全球地热直接利用的1/2,年均增幅达到20%。

世界上超过85%的地热是以100℃以下的地热水形式存在,这部分资源主要是直接利用。直接利用的主要方式为地源热泵,地热供暖、供热,地热水产养殖,地热游泳池、洗浴、温泉医疗,以及道路融雪,纺织厂漂染、洗涤等。目前开展大规模地热直接利用的国家有38个,如日本有丰富的地热资源,在北海道的札幌市,地热水为市内5个区的50%住户提供采暖;冰岛利用地热取代化石燃料供暖,占总供暖量的74%,受惠人口占全国的85%<sup>[5]</sup>。

中国地热开发工作是在地质学家李四光教授指引下开始的。1970年首先在广东丰顺建成中国第一座地热试验电站,以后又在河北怀来、辽宁熊岳、湖南灰汤、江西宜春、山东招远等地利用100℃以下地热水建立了几座50—300kW地热试验电站,取得了一些试验数据和建站经验。但由于经济效益和长期稳定运行等方面问题,目前只有广东丰顺地热电站能保存下来,其3号300kW闪蒸发电机组至今已长期稳定运行了30年。西藏羊八井电站是中国最大的地热电站,在1977—1991年这15年中装机容量总共为25.18MW,其最后一台3MW机组于1991年初投入运行。中国地热发电的最新进展是2008年在西藏羊八井新增的利用地热蒸汽的2MW螺杆膨胀机发电系统<sup>[5]</sup>。

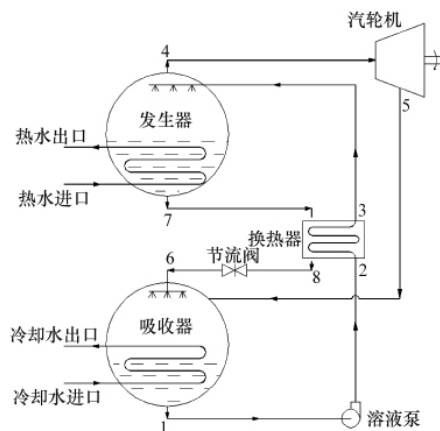
中国具有丰富的中低温地热资源,且地热直接利用量长期以来占据世界首位,目前直接利用总装机容量为8898MW,年产能 $7.53 \times 10^{13}$ kJ/a。地热直接利用的发展同样得益于地源热泵技术的推广应用,截至2010年底,中国地源热泵用于建筑空调采暖面积已达到1.4亿m<sup>2</sup>,全国地热供暖面积达到3500万m<sup>2</sup>,洗浴和种植使用地热热量约合50万t标准煤,各类地热能总贡献量合计500万t标准煤。中国中低温地热资源的利用在局部地区取得了良好的效果,如北京市和天津市利用地热水进行冬季供暖,减少化石燃料的使用,在改善两市的大气环境方面产生了良好的效果;又如在广东省的紫金

县、惠东、陆河等地利用40—80℃的地热水为名贵水产越冬养殖供热,取得了良好的节能与经济效益。但与发达国家相比,中国大部分中低温地热资源的利用仍采用简单、原始的利用方式,特别是许多地热旅游宾馆在利用70—90℃地热水时,往往要靠自然冷却将温度降低到50℃以下用于洗浴和理疗,使大量热能白白浪费掉<sup>[5]</sup>。

## 2 动力系统介绍

基于Kalina循环理念,本文提出了氨水溶液动力循环(图1)。该动力循环根据吸收式制冷循环原理,采用发生器代替蒸发器,吸收器代替冷凝器,简化了Kalina循环系统<sup>[5]</sup>。

AWPC循环系统由发生器、吸收器、透平发电机、溶液热交换器、溶液泵、节流阀组成。其工作原理为地热水进入发生器,加热发生器内的氨水溶液,使含有少量水蒸气的氨蒸气从发生器出口进入透平做功而产生电力,发电后的低压低温氨蒸气进入吸收器并被来自发生器的稀溶液吸收,放出的热量被冷却水带走,完成整个循环过程;在发生器和吸收器之间形成1个氨水溶液循环环路,自吸收器出来的浓溶液通过溶液泵加压进入溶液热交换器,回收部分能量后进入发生器<sup>[6]</sup>。



1—吸收器溶液出口;2—换热器冷溶液进口;3—换热器冷溶液出口;4—发生器气体出口;5—汽轮机排气口;6—吸收器溶液进口;7—发生器溶液出口;8—换热器热溶液出口

图1 氨水溶液动力循环系统示意图

Fig. 1 Scheme of the AWPC system

## 3 动力系统性能分析

### 3.1 氨水溶液浓度对系统性能的影响

AWPC循环系统最大的特征就是可以通过调节氨水溶液的质量分数来实现系统性能的改变,下面重点分析不同溶液浓度工况下循环性能的变化情况。设定工况参数如下:地热水初温100℃,地热水流量20kg/s(72t/h),冷却水初温20℃,循环倍率为4,浓溶液质量分数为20%—60%,发生器、吸收器端部温差为5K。

图2给出了电力产率和热效率随浓溶液质量分数的变化趋势,可以看出,随着浓溶液质量分数的增加,电力产率和

热效率均开始降低,并在浓溶液质量分数为 35%时达到最低,之后又呈现递增趋势。循环毛功率和净功率也表现出相同的变化规律,而溶液泵功则随着浓溶液质量分数增加呈指数增长(图 3)。

对浓溶液质量分数较低工况,系统发生压力和吸收压力

均较低(图 4),尤其是吸收压力在低质量分数下可能出现负压,这对系统十分不利,因此虽然在较低质量分数工况下系统性能较高,但由于系统在吸收器端处于负压,系统对密封性的要求非常高,一旦空气渗入,系统实际出力将显著下降。

### 3.2 循环倍率对系统性能的影响

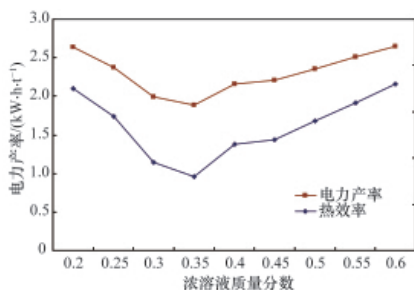


图 2 电力产率和热效率随氨水溶液质量分数的变化

Fig. 2 Variations of net power per unit geofluid and heat efficiency with ammonia water mass fraction

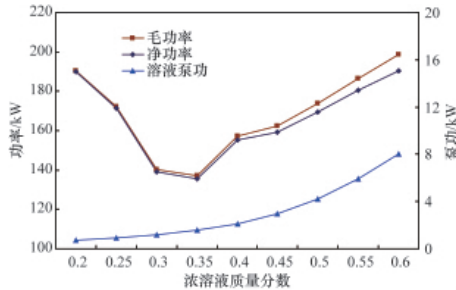


图 3 各项功率随氨水溶液质量分数的变化

Fig. 3 Variations of every power with ammonia water mass fraction

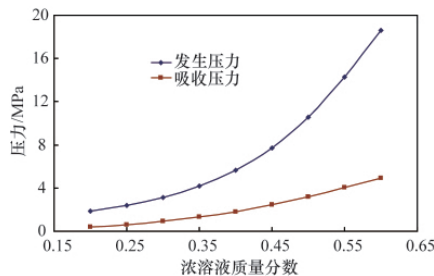


图 4 发生和吸收压力随氨水溶液质量分数的变化

Fig. 4 Variations of generator and absorption pressure with ammonia water mass fraction

循环倍率为浓溶液质量流量与氨蒸气质量流量的比值,是影响 AWPC 循环性能的主要因素。设定工况参数如下:地热水初温 100℃,地热水流量 20kg/s (72t/h),冷却水初温 20℃,循环倍率 2—6,浓溶液质量分数 60%,发生器、吸收器端部温差为 5K。

图 5 显示了 AWPC 循环存在最优的循环倍率,以“电力产率”为优化目标,最佳的循环倍率约为 4,而以“热效率”为优化目标,最佳的循环倍率约为 5。值得注意的是,在循环倍率为 4.5 时出现了一个拐点,这很可能是因为当循环倍率达到 5 时,氨蒸气通过透平做功后有一部分氨水溶液析出,如果

引用有机工质的“干度”概念,氨蒸气此时的干度为 0.96,而循环倍率为 4.5 时,做功后的氨蒸气干度为 1。系统毛功率和净功率也表现出相同的变化趋势,而溶液泵功则随循环倍率呈递增趋势(图 6)。

图 7 给出了氨蒸气质量分数、稀溶液质量分数以及浓溶液与稀溶液的质量分数差随循环倍率的变化趋势。可以看出,氨蒸气质量分数和稀溶液质量分数稍有增加,并趋于平缓;浓溶液与稀溶液的质量分数差则随循环倍率的增加而大幅降低,浓溶液与稀溶液的质量分数差为 12.6% 时,系统电力产率达到最大。

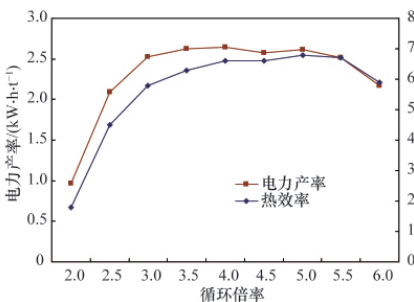


图 5 电力产率和热效率随循环倍率的变化  
Fig. 5 Variations of net power per unit geofluid and heat efficiency with circulation ratio

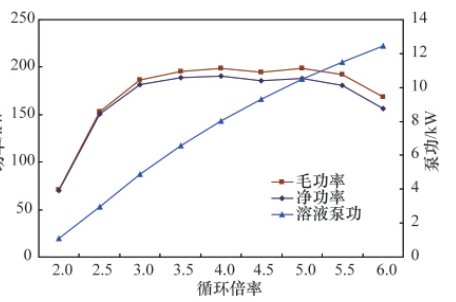


图 6 各项功率随循环倍率的变化  
Fig. 6 Variations of every power with circulation ratio

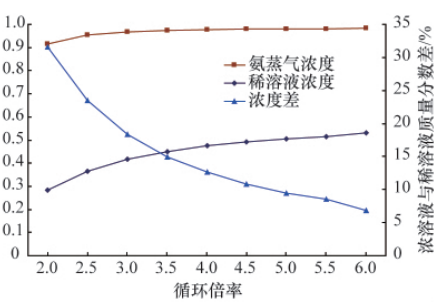


图 7 各项质量分数随循环倍率的变化  
Fig. 7 Variations of every mass fraction with circulation ratio

### 3.3 系统性能与温度的关系

与 ORC 循环一样,AWPC 循环性能与地热水初温、冷却水初温及传热温差息息相关;与 ORC 循环不同的是,AWPC 循环的氨水溶液在发生器内的加热过程为定压变温过程,不

用考虑窄点温差,只需要确定发生器的最小端部温差。同样,吸收器也存在最小端部温差。设定工况参数如下:地热水初温为 80—120℃,地热水流量为 20kg/s (72t/h),冷却水初温为 5—40℃,循环倍率为 4,浓溶液质量分数为 60%,发生器、吸

收器端部温差为 2—14K。

图 8 给出了电力产率、热效率随地热水初温的变化趋势,可以看出,随着地热水初温的升高,电力产率和热效率均显著提升。地热水初温的提升将显著降低换热面积比率(图 9),这就意味着地热水温度越高,机组的单位成本将越低。

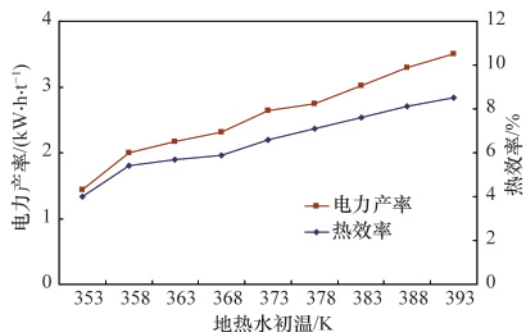


图 8 电力产率和热效率随地热水初温的变化

Fig. 8 Variations of net power per unit geofluid and heat efficiency with geothermal water initial temperature

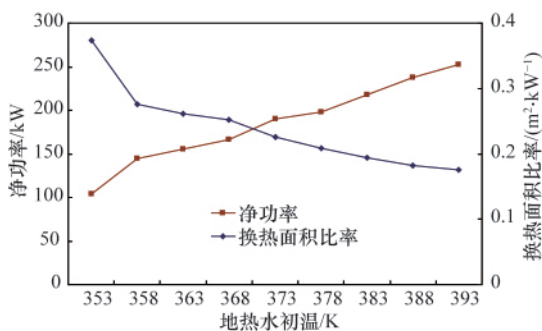


图 9 净功率和换热面积比率随地热水初温的变化

Fig. 9 Variations of net power and heat exchange area rate with geothermal water initial temperature

#### 4 地热资源综合梯级利用模式探讨

广东省丰顺县的地热资源开发存在热能利用率较低,资源浪费大等问题,地热资源开发应遵循“积极稳妥,因地制宜,合理开发,综合利用”的方针,丰顺县地热利用应进一步规范地热资源的管理,合理高效规划地热资源,使地热资源服务于地方和人民。

利用丰顺县丰富的中低温地热资源,可形成 5 级梯级利用模式,其中第 1 级地热(90—100℃)优先考虑用来发电;发电后的第 2 级地热(约 70—80℃)用于建筑夏季空调、兼顾冬季采暖;第 3 级地热(约 60—65℃)用于居民住宅生活热水和农副产品干燥;第 4 级地热(约 40—45℃)用于温泉度假村洗浴、疗养以及渔业养殖、花卉温室;对第 5 级地热(约 30—35℃),通过采用热泵技术提升温度,使返回到第 3—4 级。通过上述 5 级梯级利用,实现地热资源综合利用率达到 70% 以上。地热资源高效综合梯级利用示意图如图 10 所示。

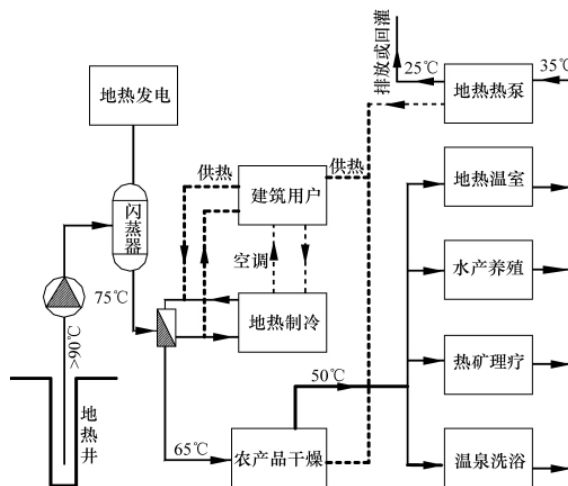


图 10 丰顺地热资源梯级利用示意图

Fig. 10 Scheme of geothermal resource cascade utilization in Fengshun

已有勘查数据表明,丰顺县邓屋、丰良、汤坑、石湖等地均具备发电的地热资源,按邓屋电站规模来推算,丰顺县利用现有地热点可实现装机 1MW 的地热电站,全年可为全县供应 600 万度电。利用这一清洁能源全年可节约标煤约 2000t,实现二氧化碳等废气的减排约 5000t。利用发电后的地热水为建筑提供制冷空调,可以供应约 9 万 m<sup>2</sup> 的建筑,与传统空调相比,全年可节约电力约 500 万 kW·h,为建筑业带来显著的经济效益。通过实施地热资源综合梯级利用项目,全年可充分利用 1.5×10<sup>12</sup>kJ 的地热能量,节约标煤约 2.5 万 t,实现二氧化碳等废气减排约 6 万 t。此外,项目的实施还可以带动其他相关产业如旅游业、房地产、农副产品加工、温室、养殖等的经济收入,极大带动当地经济的迅速发展,对提高城镇居民收入水平和带动城镇经济发展具有重要意义。

#### 5 结论

本研究将氨水溶液作为工质,提出新型氨水溶液动力循环系统(AWPC),同时提出了一套高效的地热综合梯级利用系统。

(1) 相对于 ORC 循环,影响 AWPC 循环性能的因素更为复杂,这些因素中氨水溶液质量分数、循环倍率、热源和冷源温度、换热器端部温差是关键因素;

(2) 可以通过调节氨水溶液质量分数来改变 AWPC 循环性能,较高的氨水溶液质量分数有利于避免系统出现负压,但质量分数过高时会使系统压力太大,对设备的要求也比较苛刻。

(3) AWPC 循环系统存在最佳的循环倍率,对中低温地热工况,最佳的循环倍率约为 4,而对应的浓氨水和稀氨水溶液质量分数差范围为 12%—13%。

(4) 地热资源的高效综合利用已成国内外关注的热点,

中国应结合地区需求,开发出一套具有地域特征的地热资源综合梯级利用集成系统,使地热这一宝贵的清洁能源得以高效利用,从而在用好资源的同时大大节约资源。

#### 参考文献 (References)

- [1] 汪集旸, 孙占学. 神奇的地热 [M]. 北京: 清华大学出版社, 广州: 暨南大学出版社, 2001.  
Wang Jiyang, Sun Zhanxue. Magic geothermal resource [M]. Beijing: Tsinghua University Press, Guangzhou: Jinan University Press, 2001.
- [2] Luo C, Huang L C, Gong Y L. Thermodynamic comparison of different types of geothermal power plant systems and case studies in China[J]. *Renewable Energy*, 2012, 48: 155-160.
- [3] 吕灿仁, 严晋跃, 马一太. Kalina 循环的研究和开发及其提高效率的分析[J]. *热能动力工程*, 1991, 6(1): 1-7, 12.
- Lu Canren, Yan Jinyue, Ma Yitai. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 1991, 6(1): 1-7, 12.
- [4] 陈亚平. 改进型卡列纳循环的热力分析 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 1989, 19(4): 52-59.  
Chen Yaping. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 1989, 19(4): 52-59.
- [5] Lund J W, Freeston D H, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy: 2010 worldwide review [C]//*Proceedings of World Geothermal Congress 2010. USA, 2010: no. 0007.*
- [6] Luo C. Thermodynamic analysis of geothermal binary power system[C]//*Proceedings of 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. USA: IEEE, 2012: 804-807.*

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)

#### · 学术动态 ·



## “第四届全国岩土与工程学术大会”征文

中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和中国地质学会工程地质专业委员会将于2013年11月1日于杭州召开“第四届全国岩土与工程学术大会”。

**征稿范围:**岩土的基本性质与本构关系;岩土工程数值分析与仿真;边坡、基坑与地下工程典型案例;岩土力学实验研究方法;软土地基处理的新概念、新技术、新工艺;复杂地质条件下施工安全和工程稳定问题;岩土工程的加固与防护新理念、新方法、新技术;重大地质灾害形成机理预警与防治;环境友好的岩土工程技术;岩土文物的勘察与保护技术;岩土与工程技术应用的新领域;岩土工程风险评估与管理;其他。

**全文截稿日期:**2013年4月30日。

**联系电话:**0571-56738228。

**通信地址:**杭州市潮王路22号 国水电顾问集团华东勘测设计研究院科技信息部, 310014。

**电子信箱:**chen\_p@ecidi.com。

**大会网站:**[http://www.csrme.com/CN/News/2012-09/EnableSite\\_ReadNews36812321347897600.html](http://www.csrme.com/CN/News/2012-09/EnableSite_ReadNews36812321347897600.html)。