

# 河北沧县台拱带中、低温地热资源 ORC 发电 与综合梯级利用

秦祥熙<sup>1, 2, 3)</sup>, 张萌<sup>3)</sup>, 叶佳<sup>3)</sup>, 刘红梅<sup>3)</sup>, 王贵玲<sup>1)</sup>, 石建省<sup>1)\*</sup>

1)中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061; 2)中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3)浙江陆特能源科技股份有限公司, 浙江杭州 310051

**摘要:** 京津冀地热资源梯级综合利用(献县)科研基地大地构造位置位于华北平原沧县台拱带之献县断凸, 利用其地下蓟县系岩溶裂隙热储层热水开展中低温地热发电与综合梯级利用研究。地热发电装机容量 280 kW, 采用 ORC 向心透平膨胀技术, 系统工质为 R245fa。分别于 2018 年 2 月 4—6 日(冬季)、2018 年 3 月 6—16 日(春季)进行两次试运行, 累计发电时长 274 h, 累计发电量 36 956 kWh, 平均发电效率 9.1%, 最高 10.4%。发电效率高于我国已有中低温地热发电项目, 在目前国际中低温 ORC 地热发电项目中处于较高水平。试运行期间发电机组整体运行效果较好且运行稳定, 冬季地热发电机组运行效果好于春季。科研基地建设完成后, 将进行发电、供暖、地热生态园三级利用, 按照 90~95/25℃的地热水热能潜力, 综合发电供暖两级利用计算能源综合利用率将达 70%~76%。

**关键词:** 中低温地热资源; 地热发电; ORC; 地热梯级利用

中图分类号: P314.9 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2019.011101

## ORC Power Generation and Integrated Cascade Utilization of Medium-low Temperature Geothermal Resources in Cangxian Bulge Region, Hebei Province

QIN Xiang-xi<sup>1, 2, 3)</sup>, ZHANG Meng<sup>3)</sup>, YE Jia<sup>3)</sup>, LIU Hong-mei<sup>3)</sup>, WANG Gui-ling<sup>1)</sup>, SHI Jian-sheng<sup>1)\*</sup>

1) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061;  
2) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;  
3) Zhejiang Loopmaster Energy Science & Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051

**Abstract:** The geotectonic position of Beijing-Tianjin-Hebei Region research base (Xianxian county) is Xianxian county fault arch, formerly Cangxian County uplift, in North China Plain. The research base has studied medium-low temperature geothermal power generation and integrated cascade utilization by using the thermal water in Jxz karst fissures geothermal reservoir. The capacity of the geothermal power generation is 280 kW, ORC centripetal turbine technology is used, and the system working fluid is R245fa. Two test runs were carried out on February 4-6 (in winter) and March 6-16 (in spring) of 2018. The cumulative power generation time was 274 hours, the cumulative power generation was 36 956 kWh, and the average power generation efficiency was 9.1%, with a maximum of 10.4%. The power generation efficiency is higher than that of China's existing low-temperature geothermal power generation projects, and is also at a relatively high level in the current international projects. The generator set worked well and stably during the test run. The geothermal generator operated better in winter than in spring. After the construction of the scientific research base, three levels of utilization of power generation, heating and geothermal ecological parks will be carried out. According to the thermal energy potential of geothermal water at 90~95/25 °C, the comprehensive utilization rate of the two-stage

收稿日期: 2018-09-29; 改回日期: 2018-12-27; 网络首发日期: 2019-01-14。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 秦祥熙, 男, 1981年生。博士研究生。主要从事水文地质、地热地质及环境地质相关研究。E-mail: qxx@luter.cn。

\*通讯作者: 石建省, 男, 1962年生。研究员, 博士生导师。主要从事地下水资源调查评价、中国黄土研究、脆弱带地质生态学、地热地质等相关研究。E-mail: tiger7886@263.net。

utilization of integrated power generation and heating will achieve 70%~76%.

**Key words:** medium-temperature geothermal resources; geothermal power generation; ORC; geothermal cascade utilization

按热储层温度不同, 地热资源可分为高温( $\geq 150^\circ\text{C}$ )、中温( $90\sim 150^\circ\text{C}$ )和低温( $25\sim 90^\circ\text{C}$ ), 其中高温地热资源和中温地热资源均可用于发电。地热能发电具有热效率高、稳定性强、不受气候影响、占地面积小、生态影响小的优势; 但受初投资高、回收期长、资源评估较难、社会资本接受程度低等影响, 全球地热发电的装机容量与增长率当前还低于风能与太阳能发电(Li et al., 2015)。

我国水热型中低温地热资源广泛分布于包括华北平原在内的十五个大型沉积盆地和山地断裂带上, 总发电潜力达 150 万 kW。但由于技术、经济等原因, 中低温地热发电产业自 20 世纪 70 年代掀起一股热潮后就止步不前, 目前仅剩广东丰顺 300 kW 的一个地热试验电站仍在运行, 其余则相继关停(叶慰年, 1994; 周念沪, 2005; 郑克棧和潘小平, 2009; 廖月芝等, 2011; Lund et al., 2015; An et al., 2016; 刘凤钢等, 2016; 王贵玲等, 2017)。

国家《地热能开发利用“十三五”规划》的发布有利地推动了我国地热能产业的发展进程, 尤其是发展严重滞后的地热发电产业。本文对京津冀地热资源梯级综合利用(献县)科研基地(以下简称“科研基地”)中低温地热资源 ORC 发电与综合利用的成果进行介绍和分析, 以期对同类型项目提供参考和指导。

## 1 区域地质条件

科研基地位于河北省沧州市献县东北部梅庄洼农场, 距北京市约 200 km, 距石家庄约 150 km, 距雄安新区仅 80 km, 具有良好的区域优势(图 1)。

### 1.1 构造断裂

献县及其周边地区跨两个Ⅲ级构造单元, 即位

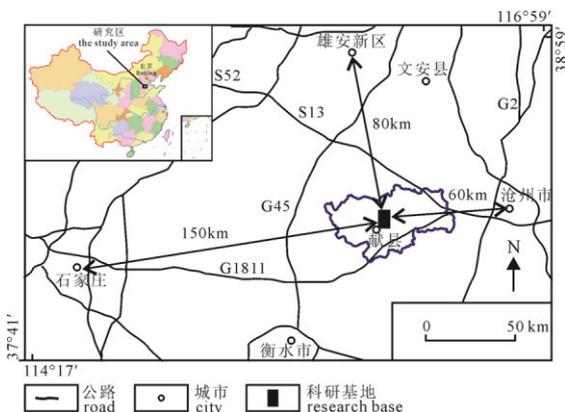


图 1 交通位置示意图

Fig. 1 Traffic location of the study area

于献县东部的沧县台拱带和位于献县西部的冀中凹陷区, 所处的Ⅳ级构造单元位置自西向东分别为饶阳断凹、献县断凸、阜城断凹以及青县断凸(图 2)。

区内最主要的断裂为献县断裂, 为一条继承性断裂, 自太古界至新生界都在活动, 具有延伸长、断距大的特点, 控制着献县地区的构造格局和地层沉积。以献县断裂为界, 两侧基岩埋深差超过 1 000 m。西部冀中拗陷Ⅳ级构造单元饶阳凹陷区内基岩埋深大于 4 000 m, 东部沧县台拱Ⅳ级构造单元献县凸起区缺失馆陶组和古近系沉积, 基岩埋深 1 300~1 500 m 左右。沧县台拱带还有多个次级的Ⅳ级断裂控制着献县凸起等Ⅳ级构造单元, 成为这些构造单元的分界断裂, 对新近系和古近系的沉积有重要影响。

### 1.2 地层岩性

献县地区地层主要为新生界、古生界和中上元古界, 自新至老依次为第四系、新近系明化镇组、新近系馆陶组、古近系沙河街组、古近系孔店组、石炭—二叠系、奥陶系、寒武系、蓟县系雾迷山组和高于庄组。

明化镇组全区均有分布, 底界埋深 1 100~1 800 m, 岩性主要为泥岩、砂质泥岩、钙质页岩等互层。馆陶组在沧县台拱区普遍缺失, 冀中台陷区底界埋深 1 400~2 000 m, 局部达 2 000 m 以上, 岩性由泥岩与砾砂岩、泥质砂岩、钙质砂岩等交互组成。

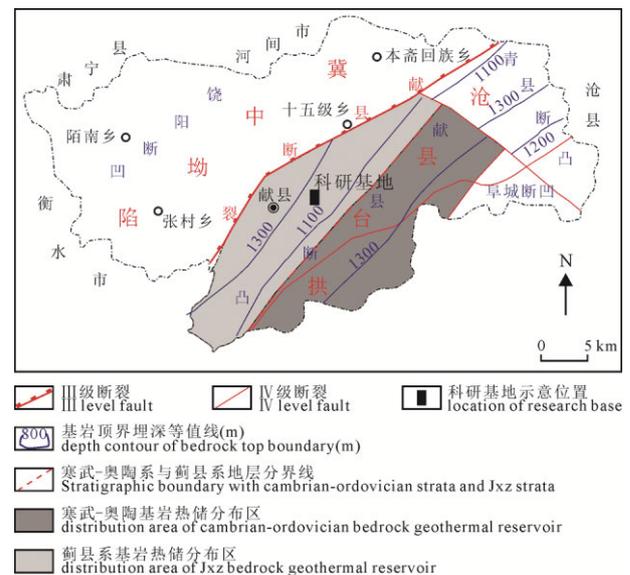


图 2 区域构造单元与基岩热储分布示意图

Fig. 2 Regional structural units and distribution of bedrock geothermal reservoirs

寒武—奥陶系 4 000 m 以浅主要分布在沧县台拱区献县断凸的东端(图 2), 岩性以灰色-深灰色白云岩、灰色-褐灰色竹叶状或鲕状灰岩、棕黄色泥页岩、棕红色泥岩等为主。蓟县系雾迷山组 4 000 m 以浅主要分布在沧县台拱区献县断凸的西端, 岩性以浅灰色燧石条带白云岩、厚层状叠层石白云岩、灰色含粗晶白云岩、沥青质白云岩等为主。

## 2 地热资源赋存特征

献县地区主要赋存新近系孔隙型热储和基岩岩溶裂隙热储层, 前者热水温度较低(40~70℃)不宜用于发电。具有发电潜力的为基岩岩溶裂隙热储层, 可划分为寒武—奥陶系岩溶裂隙热储和蓟县系岩溶裂隙热储。科研基地主要利用蓟县系岩溶裂隙热储层热水进行发电。

蓟县系岩溶裂隙热储分为雾迷山组和高于庄组。雾迷山组热储顶界埋深 1 100~1 500 m, 储厚比 15%~30%, 热储厚度 120~350 m, 岩溶裂隙发育, 裂隙度约为 3.3%, 水温 90~100℃, 涌水量 80~120 m<sup>3</sup>/h, 溶解性总固体一般为 6.0~6.5 g/L, 水质类型主要为 Cl-Na 型。高于庄组热储埋藏较深, 目前还未开采利用, 目前仅科研基地内 GRY1 号钻孔揭露, 热储岩性为白云岩, 与上覆地层不整合接触, 裂隙发育, 连通性好, 该热储顶板埋深 3 767.46 m, 出口水温达 103.5℃, 涌水量 69.38 m<sup>3</sup>/h, 溶解性总固体为 6.3 g/L, 水质类型为 Cl-Na 型。

## 3 中低温地热发电及试运行效果

科研基地内现有地热井 3 口, 基本情况见表 1。设计利用 GRY1 和 XXZK-1 热水混合后进行发电, 装机容量 280 kW/h, 发电后出水通过板式换热器换热后制取热水, 采用直供或热泵提升的方式为附近居民建筑供暖, 供暖后低温热水通过 XXZK2 井回灌。

试验阶段发电量仅供科研基地使用, 所需电量较少, 因而仅抽取 GRY1 地热井热水进行地热发电与地热供暖梯级利用。

### 3.1 地热发电系统及原理

中、低温地热发电技术主要有闪蒸发电技术、

表 1 科研基地地热井基本情况  
Table 1 Basic information of geothermal wells in the research base

井号	GRY1	XXZK-1	XXZK-2
终孔深度/m	4025.82	2500.18	2004
终孔层位	蓟县系高 于庄组	蓟县系雾 迷山组	蓟县系雾 迷山组
水温/℃	103.50	83.00	83.00
涌水量/(m <sup>3</sup> /h)	69.38	109.29	100.00
水化学类型	Cl-Na 型	Cl-Na 型	Cl-Na 型

表 2 发电机组技术参数表  
Table 2 Technical parameters of the generating set

名称	单位	ORC机组
设备型号	—	Pure Cycle
电压	V	380/400
冷凝器换热量	kW	3 200
冷却水温	℃	10~32
冷却水流量	m <sup>3</sup> /h	500
热水出口温度	℃	72
额定发电量	kW	280
净输出发电量	kW	270

双工质发电技术、联合循环或混合式地热发电技术。此外, 区别于上述技术的“地热能→机械能→电能”的发电原理, 一种利用温差热电效应, 将地热能直接转化为电能的地热发电技术正在研究中(谢和平等, 2018)。对于中、低温的热水型地热资源, 以有机朗肯循环(ORC, Organic Rankine Cycle)双工质发电技术应用较为广泛。

科研基地采用 ORC 向心透平膨胀发电, 机组型号及主要参数如表 2 所示, 系统工质为 R245fa(五氟丙烷)。其原理为工质进入蒸发器后被高温流体(地热流体)加热产生高压蒸汽, 高压蒸汽进入透平膨胀做功进而带动发电机产生电能, 膨胀后的低压

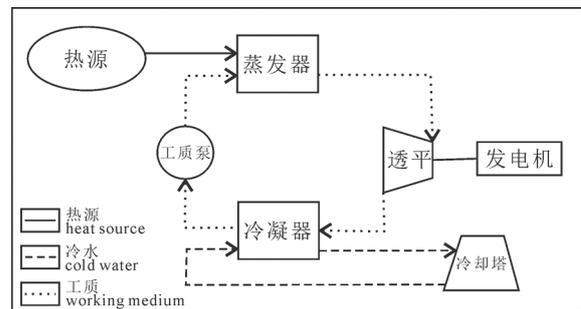


图 3 ORC 透平膨胀发电原理示意图

Fig. 3 Electric-generation principle of ORC Turbine expansion

表 3 地热发电试运行数据表  
Table 3 Trial run data of geothermal power generation

监测项目/平均值	2月4—6日 (冬季)	3月6—16日 (春季)
蒸发器进口温度/℃	94.5~95.5/95	91.3~95.1/93.6
蒸发器出口温度/℃	71.7~73.2/72.3	71.1~75.9/73.9
冷凝器进口温度/℃	11.1~13.5/12.5	13~19.1/15.7
冷凝器出口温度/℃	14.9~17.8/16.5	15.4~22.7/18.7
透平进口温度/℃	77~79.1/78.3	73.1~79.1/76.9
透平出口温度/℃	11.5~14.4/13.2	14.3~20/16.8
透平进口压力/kPa	740~760/750	700~794/751
透平出口压力/kPa	170~190/181	195~259/221.2
地热水流量/(m <sup>3</sup> /h)	59~61/60.1	67~69/68.1
总发电功率/(kW/h)	155~159/157	122~138/130
净输出功率/(kW/h)	140~149/145	112~129/121
发电效率/%	9.5~10.4/9.9	7.3~9.9/8.3
气温/℃	-10~3/-2.4	-2~22/5.4

蒸汽进入冷凝器,被冷却为低温低压的工质流体,工质流体通过增压泵升压后再次进入蒸发器完成整个循环(图 3)。

### 3.2 地热发电试运行情况

机组共进行两次试运行(表 3),第一次为 2018 年 2 月 4—6 日(冬季),机组开机前调试阶段经过较长时间连续抽水,运行时间 49 h,累计发电量 7 693 kWh,累计净输出电量 7 103 kWh,折算平均发电功率 157 kW/h、平均净输出功率 145 kW/h,平均发电效率 9.9%。

第二次为 2018 年 3 月 6—16 日(春季),运行时间 225 h,累计发电量 29 263 kWh,累计净输出电量 27 130 kWh,折算平均发电功率 130 kW/h、平均净输出功率 121 kW/h,平均发电效率 8.3%。

### 3.3 地热发电试运行效果分析

试运行期间,冬季发电效率最高 10.4%,最低 9.5%,平均 9.9%;春季发电效率最高 9.9%,最低 7.3%,平均 8.3%。且春季发电量在 125~135 kW 区间内的小时数为 183 小时,占总发电时间的 81%,上下波动范围仅 5%左右;发电效率在 8%以上的小时数为 174 小时,占总发电时间的 77%。发电机组整体运行效果较好且运行稳定。

发电机组从地热水中获得的热量一部分用于发电,一部分在透平发电过程中散失。冬季发电机组热损失量占总吸收热量的 90.1%,用于发电的热量占 9.9%;其中 0.8%为机组自耗电量,用于驱动内置油泵、工质泵;余下 9.1%转化为净发电量(图 4)。

春季发电机组热损失量占 91.7%,用于发电的热量占 8.3%,其中 0.6%为机组自耗电量,7.7%转化为净发电量。由此可见,冬季地热发电机组运行效果好于春季。

全球各类地热发电厂平均发电效率为 12%,其中双循环地热电站发电效率在 6.6%~37.93%(Zarrouk and Moon, 2014),而中低温地热发电效率

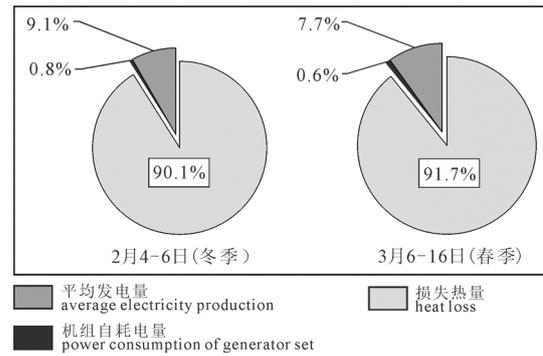


图 4 地热发电系统能量平衡图

Fig. 4 Energy balance of the geothermal power generation system

在 5%~9%(Hettiarachchi et al., 2007)。试运行期间,科研基地发电效率冬季为 9.9%,春季为 8.3%,两季平均为 9.1%,最高值达 10.4%,高于我国已有中低温地热发电项目与部分国外中低温 ORC 地热发电项目(叶慰年, 1994; 徐名捷等, 1995; Köhler, 2005; Holdmann et al., 2007),在目前国际中低温 ORC 地热发电项目中处于较高水平(Hettiarachchi et al., 2007; Tchanche et al., 2011)(表 4)。

### 3.4 地热发电影响因素

ORC 发电系统性能受到工质种类、蒸发压力、冷凝压力、环境温度等多种因素的影响(Wei et al., 2007; 顾伟, 2010)。

科研基地地热发电系统试运行期间,系统工质均为 R245fa,具有无毒、不可燃、无腐蚀等优点,且当系统以最大净发电功率为目标时为最佳适用工质(王建永等, 2017)。

试运行期间,冬季机组开机前调试阶段经过较长时间连续抽水,而春季为同步开启机组调试与抽水工作。因此,虽然两季对比蒸发器进口温度相对稳定(冬季平均 95℃、春季平均 93.6℃),但春季波动稍大于冬季。受蒸发器进口温度影响,透平进口压力表现为同样的变化规律,即冬季与春季均值相

表 4 国内外部分中低温地热发电项目/设计效率

Table 4 Generating efficiency of Medium-low temperature geothermal power generation

项目地	发电技术	热源温度/℃	热源流量	装机容量/kW	工质	发电效率/%	数据来源
Chena, America	ORC	73.3	120.31 m <sup>3</sup> /h	250	R134a	8.20	Holdmann et al., 2007
Neustadt-Glewe, German	ORC	95.6	70 m <sup>3</sup> /h	210	C5F12	6.40	Köhler, 2005
					PF5050	7.80	
/	ORC	90.0	/	/	HCFC123	9.80	Hettiarachchi et al., 2007
					NH3	8.90	
					C5H12	9.90	
					C4H10	12.90	
Otake, Japan	ORC	130.0	14.661 kg/s	/	R-114	9.81	Tchanche et al., 2011
Nigorikawa, Japan	ORC	140.0	50 kg/s	/	R-114	9.81	
广东丰顺	闪蒸	91.0	230 m <sup>3</sup> /h	300	水	5.83	徐名捷等, 1995
湖南灰汤	闪蒸	92.0	140 m <sup>3</sup> /h	300	水	6.00	叶慰年, 1994

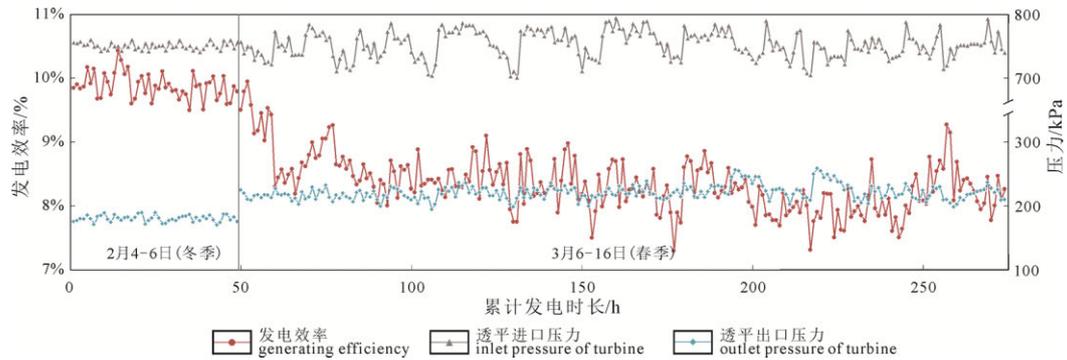


图 5 发电效率与透平进出口压力关系图

Fig. 5 Relationship between generating efficiency and inlet & outlet pressure of Turbine

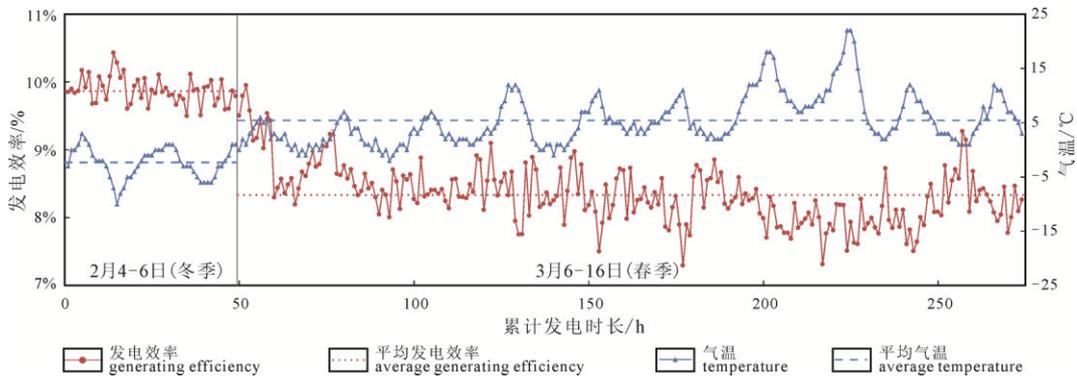


图 6 发电效率与气温变化相对关系图

Fig. 6 Relationship between generating efficiency and temperature variations

差不多(冬季平均 750 kPa、春季平均 751 kPa), 但春季波动大于冬季(图 5)。

从图 5 中可以看出, 发电效率与透平进口压力并无明显的相关关系, 而与透平出口压力呈现负相关关系较为明显。冬季透平出口压力变化范围为 170~190 kPa, 平均 181 kPa; 春季为 195~259 kPa, 平均 221 kPa; 而冬季机组发电效率明显高于春季。

发电机组试运行期间气温变化较大, 冬季气温变化范围为-10~3℃, 平均-2.4℃, 春季为-2~22℃, 平均 5.4℃。不同季节对比来看, 冬季发电效率明显高于春季; 而同一季节试运行期间, 发电效率与室外气温同样表现出明显的负相关关系, 即随着室外气温的升高, 发电机组的发电效率降低(图 6)。这与环境温度对系统性能的影响规律相符, 室外气温越高, 冷却水温度随之升高, 影响透平出口压力的变化, 从而导致发电效率降低(Wei et al., 2007; 谢飞博等, 2016)。

由此可见, 在同一工质、热源温度相对稳定的条件下, 科研基地地热发电机组发电效率主要受环境温度(即气温)的影响, 且与之呈负相关关系。

### 4 地热综合梯级利用效益

科研基地以地热资源综合梯级利用为导向, 自高至低逐级提取热量, 实现资源最大化高效利用

(图 7)。设计抽取 GRY1 和 XXZK-1 热水混合后经除砂通往发电机组完成一级利用; 发电后 72℃出水通过钛合金板式换热器+热泵技术为周边建筑供暖完成二级利用; 随着科研基地建设逐渐完善, 35℃供暖出水将通往地热生态园进行三级利用, 地热生态园包括地热农业(地热温室、水产养殖)和温泉理疗模块; 经三级利用后, 将 25℃尾水通过 XXZK-2 回灌。

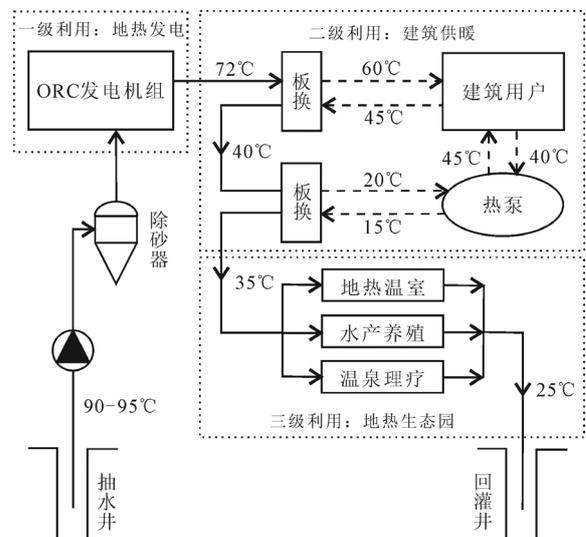


图 7 地热梯级综合利用系统流程示意图

Fig. 7 Flowchart of the geothermal integrated cascade utilization system

按照规划设计, 科研基地建成投产后装机容量 280 kW, 发电利用后出水仍有 72℃左右, 按新建节能建筑采暖热负荷指标 35 W/m<sup>2</sup> 计算, 可满足 30 万 m<sup>2</sup> 以上供暖需求。按照 90~95/25℃ 的地热水热能潜力, 综合发电供暖两级利用, 计算能源综合利用率为 70%~76%。

地热电厂年均可运行 6 000 h 以上(郑克桢和潘小平, 2009), 以现有装机容量 280 kW、全年运行按照 6 000 h 满负荷运行计算, 年均发电 168 万 kWh, 所发电量折合节约标准煤约 206 t/a, 减少二氧化碳排放量约 514 t/a, 减少碳排放量约 140 t/a, 减少二氧化硫排放量约 16 t/a。

受科研基地工程进度影响, 仅在本次春季试运行期间完成向科研基地附近农场居民供暖的二级利用。农场现有居民建筑为平房宅院, 保温隔热效果较差, 末端为散热器, 总供暖面积 3 万 m<sup>2</sup>。地热发电机组出水 71.1~73.9℃, 经板换换热后提取 5℃温差, 出水约 67℃通过 XXZK-2 井回灌。室内末端温度监测显示居民室内温度普遍达到 21~23℃, 满足《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012)的要求, 供暖效果良好。供暖期间累计供热量 91 531 kWh, 平均供热量为 407 kW, 综合地热发电与地热供暖两级利用计算能源利用率为 24.3%~35.4%, 平均 29.2%。

## 5 结论

京津冀地热资源梯级综合利用(献县)科研基地利用献县地下优质的蓟县系岩溶裂隙热储层热水进行中、低温热水发电、供暖、农业等综合梯级利用。地热发电装机容量 280 kW, 分别于 2018 年 2 月 4—6 日(冬季)、2018 年 3 月 6—16 日(春季)进行两次试运行, 累计发电时长 274 h, 累计发电量 36 956 kWh, 累计净输出电量 34 233 kWh, 折算平均发电功率 143.5 kW/h, 平均净输出功率 133 kW/h, 平均发电效率 9.1%, 最高值达 10.4%。发电效率高于我国已有中低温地热发电项目与部分国外中低温 ORC 地热发电项目, 在目前国际中低温 ORC 地热发电项目中处于较高水平。

试运行期间发电机组整体运行效果较好且运行稳定, 冬季地热发电机组运行效果好于春季, 表现在冬季机组从地热水中获得的热量用于发电的比例大于春季, 冬季发电效率(平均 9.95%)明显高于春季(平均 8.3%)。通过数据分析可知, 在工质相同、热源温度相对稳定的情况下, 机组发电效率受气温影响较大, 并与之呈明显的负相关关系, 室外气温越高, 冷却水温度随之升高, 影响透平出口压力的变化, 从而导致发电效率降低, 这与环境温度对系

统性能的影响规律相符。

受科研基地工程进度影响, 仅春季发电试运行期间完成了发电出水进行建筑供暖的二级利用, 供暖面积 3 万 m<sup>2</sup>, 两级利用能源利用率为 24.3%~35.4%, 平均 29.2%。科研基地建设完成后, 将进行发电、供暖、地热生态园三级利用, 按照 90~95/25℃ 的地热水热能潜力, 综合发电供暖两级利用计算能源综合利用率将达 70%~76%。

**致谢:** 感谢河北省煤田地质局水文地质队王东明队长与牛小军总工程师, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所刘彦广研究员在本文成文过程中给予的帮助与支持。

## 参考文献:

- 顾伟. 2010. 低品位热能有机物朗肯动力循环机理研究和实验验证[D]. 上海: 上海交通大学.
- 廖月芝, 龚宇烈, 刘国钦. 2011. 广东省丰顺县地热资源利用现状及开发模式探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 21: 92-95.
- 刘凤钢, 任舒平, 张小强. 2016. 西藏羊易地热电站超大型螺杆膨胀发电机组应用研究[J]. 能源研究与管理, (01): 58-61, 70.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-459.
- 王建永, 王江峰, 王红阳, 戴义平, 赵攀. 2017. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. 工程热物理学报, 38(1): 11-17.
- 谢飞博, 朱彤, 高乃平. 2016. 冷源温度对小型 ORC 低温余热发电系统的影响[J]. 化工学报, 67(10): 4111-4117.
- 谢和平, 昂然, 李碧雄, 邓建辉, 莫思特, 陈志禹, 唐明静, 尹聪. 2018. 基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想[J]. 工程科学与技术, 50(02): 1-12.
- 徐名捷, 罗楚豪, 李颂哲. 1995. 广东省丰顺县的地热资源及地热电站[J]. 太阳能学报, (01): 121-124.
- 叶慰年. 1994. 华中电网的地热电站[J]. 华中电力, (04): 65-66.
- 郑克桢, 潘小平. 2009. 中国地热发电开发现状与前景[J]. 中外能源, 14(02): 45-48.
- 周念沪. 2005. 地热资源开发利用实务全书[M]. 北京: 中国地质科学出版社.

## References:

- AN Qing-song, WANG Yong-zhen, ZHAO Jun, LUO Chao, WANG Yan. 2016. Direct utilization status and power generation potential of low-medium temperature hydrothermal geothermal resources in Tianjin, China: A review[J]. Geothermics, 64: 426-438.
- GU Wei. 2010. Theoretical and Experimental Study of Organic Rankine Cycle for Low and Medium Grade Heat Source Utilization[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(in Chinese with English abstract).

- HETTIARACHCHI H D M, GOLUBOVIC M, WOREK W M, IKEGAMI Y. 2007. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources [J]. *Energy*, 32(9): 1698-1706.
- HOLDMANN G. 2007. The Chena Hot Springs 400kW geothermal power plant: experience gained during the first year of operation[J]. *Geotherm Res Council Trans*, 31: 515-9.
- KÖHLER S. 2005. Analysis of the combined heat and power plant Neustadt-Glewe[C]//*Proc. World Geothermal Congress*, 1309.
- LI Ke-wen, BIAN Hui-yuan, LIU Chang-wei, ZHANG Dan-feng, YANG Ya-nan. 2015. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 1464-1474.
- LIAO Yue-zhi, GONG Yu-lie, LIU Guo-qin. 2011. Discussion on the present situation and development mode of geothermal resources utilization in Fengshun county, Guangdong province[J]. *China Population Resources and Environment*, 21: 92-95(in Chinese).
- LIU Feng-gang, REN Shu-ping, ZHANG Xiao-qiang. 2016. Application of Very Large Screw Expansion Generator Units of Geothermal Power Plant in Yangyi, Tibet[J]. *Energy Research and Management*, (01): 58-61, 70(in Chinese with English abstract).
- LUND J W, BERTANI R, BOYD T. 2015. Worldwide Geothermal Energy Utilization 2015[J]. *GRC Trans*, 39: 79-92.
- TCHANICHE B F, LAMBRINOS G, FRANGOUDAKIS A, PAPADAKIS G. 2011. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles-A review of various applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 3963-3979.
- WANG Gui-ling, ZHANG Wei, LIANG Ji-yun, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li. 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-yong, WANG Jiang-feng, WANG Hong-yang, DAI Yi-ping, ZHAO Pan. 2017. Selection of Working Fluid for Organic Rankine Cycle Used in Geothermal Power Plant[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 38(1): 11-17(in Chinese with English abstract).
- WEI Dong-hong, LU Xue-sheng, LU Zhen, GU Jian-ming. 2007. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery[J]. *Energy Conversion and Management*, 48(4): 1113-1119.
- XIE Fei-bo, ZHU Tong, GAO Nai-ping. 2016. Effect of cold source temperature on power generation of small organic Rankine cycle system with low-grade waste heat[J]. *CIESC Journal*, 67(10): 4111-4117(in Chinese with English abstract).
- XIE He-ping, ANG Ran, LI Bi-xiong, DENG Jian-hui, MO Si-te, CHEN Zhi-yu, TANG Ming-jing, YIN Cong. 2018. Principle and Technological Conception of Middle-low Temperature Geothermal Power Generation Based on Large-scale Single Crystals of Thermovoltaic Materials[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 50(02): 1-12(in Chinese with English abstract).
- XU Ming-jie, LUO Chu-hao, LI Song-zhe. 1995. Geothermal Resources and The Continuous Operation of Power Station for The Last Decade in Fengshun County, Guangdong Province[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, (01): 121-124(in Chinese with English abstract).
- YE Wei-nian. 1994. Geothermal power stations in the central China power grid[J]. *Central China Electric Power*, (04): 65-66(in Chinese).
- ZARROUK S J, MOON H. 2014. Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review[J]. *Geothermics*, 51: 142-153.
- ZHENG Ke-yan, PAN Xiao-ping. 2009. Status and Prospect of Geothermal Generation Development in China[J]. *Sino-Global Energy*, 14(02): 45-48(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Nian-hu. 2005. A practical book on the exploitation and utilization of geothermal resources [M]. Beijing: China Geological Science Publishing House(in Chinese).