

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.09.008

“地热能+”在工程实践中的综合梯级应用

Comprehensive cascade application of "geothermal energy +" in engineering practice

姜曙¹, 刘芳芳², 刘媛媛³, 陈启召³, 连丽⁴, 任梦楠⁴

JIANG Shu¹, LIU Fangfang², LIU Yuanyuan³, CHEN Qizhao³, LIAN Li⁴, REN Mengnan⁴

(1.河南工程学院, 郑州 464211; 2.国网河南省电力公司技能培训中心, 郑州 450051; 3.华电郑州机械设计研究院有限公司, 郑州 450046; 4.中国电建集团河南工程有限公司, 郑州 450051)

(1.Henan University of Engineering, Zhengzhou 464211, China; 2.State Grid Henan Skills Training Center, Zhengzhou 450051, China; 3.Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450046, China; 4.Power China Henan Engineering Company Limited, Zhengzhou 450051, China)

摘要: 面向我国碳达峰、碳中和的战略需求, 迫切需要解决节能减排问题并提高清洁能源利用率, 结合国内地热发展情况, 对地热能的利用方式进行研究。地热能的应用模式由原来仅用于发电或取暖这种单一、粗放型向梯级利用、集成应用型发展。根据某景区地热和太阳能资源条件, 设计了一种新型地热能综合梯级利用方案, 即将地热水依次用来发电、制冷、干燥、洗浴。由于地热水经过管道运输散热后仅为 80~90 °C, 国产发电机组无法用其进行发电, 需利用太阳能光热将地热水温度提高至 93 °C 后再进行发电; 发电后地热水可用来制冷, 水温由 75 °C 降至 65 °C; 制冷后的地热水再用来干燥, 水温由 65 °C 降至 50 °C; 最后 50 °C 的地热水用来洗浴。所提出的“地热能+”综合梯级利用方案可实现热泵机组、水泵等设备的近零碳供电, 可提高能源利用率, 降低运行成本, 实现能源可持续性发展。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 地热能+; 梯级利用; 地热发电; 地热制冷; 地热干燥; 地热洗浴; 清洁供热; 综合能源系统

中图分类号: TK 91 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2022)09-0059-06

Abstract: To achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality in China, and to realize energy conservation, emission reduction and clean energy utilization rate improvement, geothermal resource application methods are summarized based on the storage of geothermal energy in China. The geothermal energy application mode has developed from the single and extensive one, such as power generation or heating only, to a cascade and integrated one. According to the conditions of geothermal and solar energy of a scenic spot, a new comprehensive cascade utilization scheme for geothermal energy is designed, in which geothermal water is successively used for power generation, cooling, drying and bathing. Since the temperature of geothermal water is only 80~90 °C after heat dissipation in pipes, it cannot be applied for power generation by domestic generator sets. The temperature of geothermal water heated to 93 °C by solar energy can be used to generate electricity. Then the temperature of geothermal water drops from 75 °C to 65 °C after cooling, and reduces from 65 °C to 50 °C after drying. Finally, it reaches at 50 °C and is used for bathing. The "geothermal energy +" comprehensive cascade utilization scheme realizes the "near-zero carbon" power supply of heat pump units, water pumps and other equipment, improves energy utilization rate, reduces operating costs and achieves the sustainable development of energy.

Keywords: carbon peaking; carbon neutrality; geothermal energy +; cascade utilization; geothermal power generation; geothermal cooling; geothermal drying; geothermal bathing; clean heating; integrated energy system

0 引言

随着我国经济水平的不断提高和供暖/供冷区

域的不断增大^[1], 化石能源的消耗量越来越大, 能源供应日趋紧张, 能源消耗带来的环境问题也越来越明显。2020 年我国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”^[2-4]。面对能源和环境的双重压力, 亟须大力发展清洁能源。地热能具有储量大、受天气变化影响小、稳定性好的特点, 应用前景十分广阔^[5-7]。

我国地热资源储量丰富, 约占全球地热资源的

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-20

基金项目: 河南工程学院协同育人基金资助项目(XTYR-HKJ2021024); 河南工程学院横向项目(HKJ2021024); 中国华电集团科技项目(CHDKJ22-01-23)

1/6,且以 150 °C 以下的中低温地热为主^[8]。2015 年我国地热能年利用总量约为 6.0×10^5 TJ^[9],蒸汽型、水热型和干热岩型地热是目前利用的主要对象^[10]。近 10 年来,我国以水热型地热为主要开发对象,其直接利用量的年均增长速度高达 10%^[11],截至 2019 年年底,我国地热能直接利用的装机容量为 40.6 GW,位居世界第一^[12]。研究表明,2050 年地热资源将可为全球提供 3.9% 的能量,并降低 800 Mt 的 CO₂ 排放量^[13-15]。地热供暖是充分发挥中低温地热资源品位优势的利用方式^[16]。罗佐县等^[17]对中国地热产业发展空间进行了分析,指出我国浅层地热能利用占比居首,为 52%;其次是水热型地热供暖,占比为 27%;再次是温泉利用,占比 18%;其余利用方式占比 3%。近期应聚焦高温发电技术,中长期应聚焦中低温和干热岩发电,坚持梯级利用路线,发展“温泉+地热直接利用”模式。李健等^[6]对地热发电技术及其影响因素进行了研究,指出我国的地热资源是以 150 °C 以下的中低温地热为主,有机朗肯循环(ORC)和卡林那循环在地热发电领域有更大的发展空间。薛颀^[18]对浅层地热能高效换热技术进行了研究,指出高效能源井的取热量及释热量远高于 U 型地理管,可大幅减少工程中的换热井数量和占地面积。王贵玲等^[19]针对我国不同地区地热特点,给出了适用的地热供能模式。王文中等^[20]对我国浅层和中深层地热能的利用进行了研究,指出未来浅层地热能的研究、开发及利用应主要集中在地下换热方式、提升换热效率和减小占地空间面积等方面;中深层地热开发利用研究应集中在勘查开发、尾水回灌、地热发电及管理利用、干热岩等方向。

近些年,我国地热直接利用多应用于制冷、供暖、养殖、干燥、旅游等领域:其中,地热发电占 0.50%,供热采暖占 32.70%,医疗洗浴与娱乐健身占 32.32%,养殖占 2.55%,种植占 17.93%,工业利用占 0.44%,其他占 13.56%^[21-24]。但关于地热梯级利用的研究相对较少,对于地热与其他可再生能源耦合的研究也不多见^[25-26]。本文将某景区地热水与太阳能光热、光伏发电进行耦合,将地热水用于发电或取暖这种单一、粗放的应用模式向梯级利用、集成应用方向发展,开拓了地热能在工程中的应用范围,在工程中实践了“地热能+”的综合梯级应用。

1 资源分析

1.1 区域地热资源概况

该景区地热田属于 II-2 型,热储温度平均值为 138.8 °C。热矿水的矿区范围为东经 109°39'15" ~ 109°40'10",北纬 18°41'56" ~ 18°42'34"。20 世纪 70

年代,曾施工钻地热井孔 12 眼,目前仅存钻孔 5 个,自流泉 4 个,热矿水水温介于 66 ~ 95 °C,开采量合计为 3 031 m³/d。热矿水属于碳酸氢钠型水,对钢构件具有弱腐蚀性,对铝构件具有强腐蚀性,矿化度低,水质好。目前该景区可利用地热井(温泉眼)的资源情况见表 1。

表 1 景区自流泉的资源情况

Table 1 Situation of artesian springs in the scenic spot

钻井编号	流量/(m ³ ·d ⁻¹)	井口温度/°C
ZK1	590	92
ZK2	578	95
ZK3	187	90
ZK4	264	95

1.2 地热能梯级利用

以最大程度地提高地下热水的有效温差为原则,考虑地热利用方式对温度的要求以及当地的客观需求,将本次工程的地热梯级利用流程依次设计为地热发电、地热制冷、地热干燥、地热洗浴,地热梯级利用为串联关系如图 1 所示。

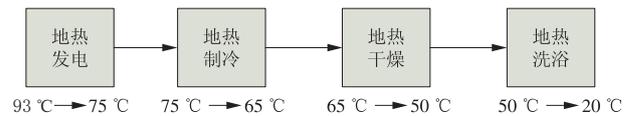


图 1 综合梯级利用流程

Fig. 1 Comprehensive cascade utilization process

1.3 地热资源分析

1.3.1 确定可利用地热水

按照上级主管部门“不新增抽水泵,不打新井”的要求,只对目前自流部分的地热水进行开发利用。该景区 4 口自流井的地热水全部流入地热水汇集站统一使用。

根据表 1,可利用的地热水总流量 = 590 + 578 + 187 + 264 = 1 619 (m³/d),可利用地热水的平均温度 = $92 \times (590/1 619) + 95 \times (578/1 619) + 90 \times (187/1 619) + 95 \times (264/1 619) \approx 93$ (°C)。

1.3.2 计算热损失

单根直埋管道单位长度的热损失为

$$q = \frac{t - t_1}{\sum R}, \quad (1)$$

式中: t 为供热介质温度, °C; t_1 为管道中心埋深处的土壤自然温度,取 5 °C; $\sum R$ 为管道总热阻, m·°C/W。

$$\sum R = R_b + R_t, \quad (2)$$

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \frac{D_w}{D_o}, \quad (3)$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda_t} \left[\frac{2h}{D_w} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_w}\right)^2 - 1} \right], \quad (4)$$

式中: R_b, R_c 分别为保温层和土壤的热阻, $m \cdot ^\circ C/W$; λ_b 为保温材料的热导率, 聚氨酯泡沫塑料热导率取 $0.033 W/(m \cdot ^\circ C)$; λ_c 为土壤的热导率, 湿土热导率取 $2 W/(m \cdot ^\circ C)$; h 为管沟中心的埋设深度, 本文取 $2 m$; D_w 为保温层外径, m ; D_0 为管道外径, m 。

以钻井 ZK4 为例($264 m^3/d$), 计算经过 $100 m$ 的 DN100 带保温材料的管道, 温降约为 $0.131 ^\circ C$ 。考虑管道温降, 到达地热水汇集站时, 地热水温度约为 $87 ^\circ C$ 。由于该温度较低, 地热发电机组选型压力大, 国产机组无法满足项目需要, 需利用太阳能光热系统对地热水进行二次加热, 来提升地热发电的热水温度。

1.4 景区太阳能资源概况

该景区地处我国华南地区, 属热带季风气候: 年平均气温为 $22 \sim 27 ^\circ C$, $\geq 10 ^\circ C$ 的积温为 $8200 ^\circ C$, 最冷的一月份温度仍达 $17 \sim 24 ^\circ C$; 太阳能年总辐射量为 $1625 \sim 1855 kW \cdot h/m^2$, 年光照时长达为 $1750 \sim 2650 h$, 光照率为 $50\% \sim 60\%$, 光温充足, 光合潜力高。

1.4.1 景区太阳能资源

(1) 辐射分析。项目地点太阳能辐射数据及逐月气温暂采用 PVsyst7.2 软件中 Meteororm8.0 数据(1991—2000 年均值, 见表 2), 选取场址中心坐标东经 $109^\circ 41'$, 北纬 $18^\circ 40'$, 海拔 $899 m$ 。

表 2 Meteororm8.0 水平面数据

Table 2 Meteororm8.0 horizontal data statistics tablet

月份	总辐射量/ ($MJ \cdot m^{-2}$)	散射辐射/ ($MJ \cdot m^{-2}$)	温度/ $^\circ C$	风速($m \cdot s^{-1}$)
1	453	238	21.2	4.5
2	395	243	21.2	3.7
3	521	292	23.1	3.6
4	568	327	25.2	3.2
5	614	328	27.3	2.7
6	576	288	27.4	2.8
7	584	301	27.1	2.9
8	599	300	27.1	3.0
9	492	310	25.9	3.2
10	509	255	25.1	4.2
11	435	221	23.4	4.5
12	394	211	20.6	4.5
平均	512	276	24.6	3.6
合计	6140	3314		

(2) 软件模拟数据分析。本项目光伏组件布置于厂区水池、泵房、车棚顶面, 光伏倾角选 $13^\circ \sim 20^\circ$ 为宜, 按最佳倾角 15° 设计, 方位角 0° 。

1.4.2 太阳能资源评价

(1) 本文根据 QX/T 89—2008《太阳能资源评估

方法》中的太阳总辐射的年总量为评价指标, 将太阳能资源划分为 4 个等级: 最丰富、很丰富、丰富、一般, 详细划分标准见表 3。

表 3 中国太阳能资源评估标准划分

Table 3 Classification of China's solar energy resource assessment standards

等级(符号)	分级阈值	
	总辐射/ $[kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}]$	总辐射/ $[MJ \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}]$
最丰富(A)	≥ 1750	≥ 6300
很丰富(B)	$\geq 1400 \sim 1750$	$\geq 5040 \sim 6300$
丰富(C)	$\geq 1050 \sim 1400$	$\geq 3780 \sim 5040$
一般(D)	< 1050	< 3780

查询 Meteororm8.0, 项目所在地的太阳总辐射为 $6140 MJ/(m^2 \cdot a)$, 根据表 3, 该等级属于 B 级“很丰富”。

(2) 资源稳定度为日总量最低值与最高值的比值(本项目资源稳定度为 0.659)。根据我国太阳能资源稳定度的等级划分(见表 4), 项目所在地的太阳能资源稳定度属于 A 级, “很稳定”。

表 4 中国太阳能资源稳定度等级划分

Table 4 Classification of solar resource stability in China

等级名称(符号)	分级阈值
很稳定(A)	≥ 0.47
稳定(B)	$\geq 0.36 \sim 0.47$
一般(C)	$\geq 0.28 \sim 0.36$
欠稳定(D)	< 0.28

(2) 直射比是衡量一个地方水平面上太阳直接辐射占总辐射的比值。根据计算, 项目所在区域近年的平均直射比为 0.46 , 等级为 C, 即散射辐射较多(见表 5)。

表 5 中国太阳能直射比等级划分

Table 5 Grading of direct radiation ratio in China

等级(符号)	分级阈值	等级说明
很高(A)	≥ 0.60	直接辐射主导
高(B)	$\geq 0.50 \sim 0.60$	直接辐射较多
中(C)	$\geq 0.35 \sim 0.50$	散射辐射较多
低(D)	< 0.35	散射辐射主导

1.4.3 光伏组件选型及安装

太阳能光伏发电最核心的器件是太阳能电池, 商用太阳能电池的主要类型为: 单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、非晶硅太阳能电池、碲化镉电池、铜铟硒电池等。

单晶硅、多晶硅太阳能电池由于制造技术成熟、产品性能稳定、使用寿命长、光电转化效率相对较高的特点, 被广泛应用于大型并网光伏电站项

目。非晶硅薄膜太阳能电池稳定性较差、光电转化效率相对较低、使用寿命相对较短,但由于其拥有良好的弱光发电能力和温度特性,在一定程度上可减少电网的波动。综合分析,本工程推荐选用单面单晶硅半片太阳能电池组件。截至目前,该类型组件市场上主流功率集中在 530~545 W_p,本工程推荐采用 540 W_p 半片组件进行设计。

太阳能电池阵列布置必须考虑前后排遮挡问题,一般的确定原则是:冬至日当天 09:00—15:00 保证阵列不会有阴影遮挡。

综上所述,该景区地热资源和太阳能资源丰富,通过地热资源的梯级利用,可满足各种用能需求。酒店旁边有空地,具备安装太阳能的条件,通过太阳能光热可以提高温泉水温,满足国产地热发电机组要求,通过太阳能光伏可以实现热泵等设备近零碳供电。

2 理论计算

$$\sum Q_{in} \times \eta_c = \sum Q_{out}, \quad (5)$$

$$\eta_g = \frac{3600W}{Q_w} = \frac{3600W}{q_m c \Delta t}, \quad (6)$$

$$EER = \frac{Q_c}{Q_h}, \quad (7)$$

$$\eta_c = \frac{Q_c}{Q_s} = \frac{Q_s - Q_L}{Q_s}, \quad (8)$$

式中: Q_{in} , Q_{out} 为换热设备流入与流出的热量; W 为 ORC 系统发电功率; q_m 为地热水质量流量; c 为水的比热容; Δt 为地热水进出口温差; EER 为吸收式热泵制冷性能系数; Q_c 为制冷量; Q_h 为吸收式制冷机消耗的热量; Q_c , Q_s 为地热资源的有效利用热量和供热量; Q_L 为整个系统损失的热量; Q_w 为 ORC 系统输入的热量; η_g , η_c 为发电设备和换热设备的工作效率; η_c 为整个系统的综合能源利用效率。

3 梯级利用方案设计

3.1 “地热能+”梯级利用系统

本项目可用于发电的地热水温度为 80~90 °C, 温度低、流量低、单机装机小,地热发电机组选型压力大,国产机组无法满足项目需要。利用太阳能光热对地热水进行二次加热,提升了地热发电的热水温度,增加了 ORC 中低温发电机组发电的稳定性和发电效率。

能源站屋面结构布置如图 2 所示,冷负荷指标取 100 W/m²,制冷功率取整 275 kW。

将地热水温度提高约 5 °C,需要的热负荷=1 619/24/3. 6×4. 2×5≈393. 5(kW)。选用槽式太阳能

低倍聚光器,单组聚光器占地面积约 20 m²,聚光效率 75%,太阳能辐射量 9 kW/m²,则需要 28 组槽式太阳能低倍聚光器,占地面积约 560 m²。项目方案最终采用 60 kW 中低温 ORC 螺杆膨胀发电机组(国产)+275 kW 制冷机组+600 kW 干燥机组+390 kW 光热+41 kW 光伏发电装置,实现地热能的梯级利用。

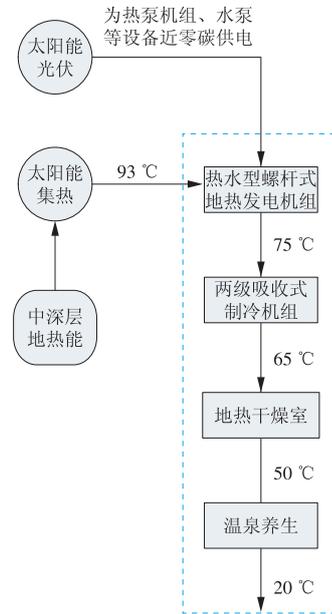


图 2 “地热能+”梯级利用系统

Fig. 2 “Geothermal energy +” cascade utilization system

3.2 “地热能+”系统设计参数

根据图 2 的流程,设计项目 ORC 发电系统、两级制冷机组和地热干燥装置参数,见表 6—8。

表 6 ORC 发电系统设计工况参数及计算结果

Table 6 Designed and calculated parameters of the ORC power generation system

项目	参数	项目	参数
机组/台	1	机组净发电功率/kW	50
发电功率/kW	60	制冷剂	R134a
热水参数流量/(t·h ⁻¹)	67	冷却水参数流量/(t·h ⁻¹)	213
入口温度/°C	93	入口温度/°C	25
出口温度/°C	75	出口温度/°C	30
水侧换热量/kW	1 300	换热量/kW	1 236

将参数代入式(1)—(8)计算可知, $\eta_g=4.26\%$, $EER=0.41$, $\eta_c=57.5\%$ 。

3.3 光伏系统

3.3.1 装机容量

本项目建设容量为 86.9 kW_p,交流侧装机 66 kW。工程生产运行期为 25 年,首年发电量为 126.1 MW·h,首年上网小时数为 1 450;运行期间的年均发电量为 117.2 MW·h,年均上网小时数为 1 348。

3.3.2 接入系统

根据国家电网公司编制的《国家电网公司分布

表7 地热两级制冷机组系统技术参数

Table 7 Technical parameters of geothermal two-stage refrigeration unit system

项目	数值
地热水温度/°C	75
尾水温度/°C	65
热水流量/(t·h ⁻¹)	67
冷水进口温度/°C	14
冷水出口温度/°C	9
冷水流量/(t·h ⁻¹)	47
冷却水进口温度/°C	30
冷却水出口温度/°C	35
冷却水流量/(t·h ⁻¹)	180
制冷功率/kW	275
配电量/kW	5
制冷效率COP	0.41

表8 地热干燥装置(房)技术参数

Table 8 Technical parameters of geothermal drying devices

名称	规格
房体/m	3.0×8.0×2.5
门/mm	192×122
送风风机/kW	0.55
抽湿风机/kW	0.55
承物推车/台	8

式光伏发电接入系统典型设计(2016版)》(设计范围为10 kV及以下电压等级接入电网,且单个并网点总装机容量小于6 MW的分布式电接入系统方案)接入电压等级规定,对于单个并网点,接入的电压等级应按照安全性、灵活性、经济性的原则,根据分布式电源容量、导线载流量、上级变压器及线路可接纳能力、地区配电网情况综合比选后确定。

分布式电源并网电压等级根据装机容量进行初步选择的参考标准见表9。

表9 分布式能源并网电压等级

Table 9 Voltage level of grid-connected distributed energy

供电电压等级/V	装机容量/kW
220	≤8
380	8~400
10 000	400~6 000

结合本工程用电现状,采用380/220 V接入现有低压配电系统方案。

3.3.3 光伏发电场主接线

泵站及水处理站直流侧均采用1 100 V系统,每16~18块光伏组件串联为一个光伏组串,汇流后接至33 kW组串式逆变器,共计2台逆变器,选用交流380 V逆变器,接入站内低压系统。

4 结论

本文以所在地地热资源条件为基础,通过将地热能、光热及光伏发电在能源站中合理配置,形成“地热能+”的综合能源系统,实现地热能由单一、粗放应用向梯级、集成应用发展,提高了能源综合利用效率,实现了用能最优。

本次工程的地热能按照温度进行梯级利用,依次用于地热发电、地热制冷、地热干燥及地热洗浴中。

通过槽式太阳能低倍聚光器加热地热水,用于中低温ORC螺杆膨胀发电机组发电;通过太阳能光伏发电,实现了热泵机组、水泵等设备的近零碳供电,最终实现了地热能的梯级利用。该项目符合国家节能减排、持续发展主题,可为其他工程提供经验。

参考文献:

- [1]李德英.我国清洁能源与清洁取暖发展机遇与挑战[R].2020国际可再生能源供热技术大会暨以太阳能为主的建筑供热论坛,内蒙古,2020.
- [2]王贵玲,杨轩,马凌,等.地热能供热技术的应用现状及发展趋势[J].华电技术,2021,43(11):15-23.
WANG Guiling, YANG Xuan, MA Ling, et al. Status quo and prospects of geothermal energy in heat supply [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 15-23.
- [3]张晋宾,周四维.碳中和体系解读[J].华电技术,2021,43(6):1-10.
ZHANG Jinbin, ZHOU Siwei. Interpretation on carbon neutrality system [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 1-10.
- [4]清华大学气候变化与可持续发展研究院.中国低碳发展战略与转型路径研究[R].北京:清华大学气候变化与可持续发展研究院,2020.
- [5]汪集暘.地热学及其应用[M].北京:科学出版社,2015.
- [6]李健,武江元,杨震,等.地热发电技术及其关键影响因素综述[J].热力发电,2022,51(3):1-8.
LI Jian, WU Jiangyuan, YANG Zhen, et al. Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 1-8.
- [7]周总瑛,刘世良,刘金侠.中国地热资源特点与发展对策[J].自然资源学报,2015,30(7):1210-1221.
ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1210-1221.

- [8] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.
- [9] 赵军, 李扬, 李浩, 等. 中低温能源在中国[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 250-260.
ZHAO Jun, LI Yang, LI Hao, et al. Mid-/low-temperature energy in China[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(2): 250-260.
- [10] 王淑娟. 可再生能源及其利用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [11] 李扬, 赵婉雨. 地热能领域产业技术分析报告[J]. 高科技与产业化, 2019(9): 46-51.
LI Yang, ZHAO Wanyu. An industrial and technical analysis report of geothermal energy[J]. High - Technology & Commercialization, 2019(9): 46-51.
- [12] 黄嘉超, 李天舒, 谷雪曦. 国际地热利用发展形势对中国的启发[J]. 石化技术, 2020, 27(9): 252-253.
HUANG Jiachao, LI Tianshu, GU Xuexi. Inspiration of international geothermal utilization development situation to China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(9): 252-253.
- [13] 苗杉. 国外地热政策探析及对我国的借鉴意义[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2015, 31(19): 87-90.
- [14] Technology roadmap: Geothermal heat and power [R]. International Energy Agency, 2011: 1-52.
- [15] PAN S Y, GAO M Y, SHAH K J, et al. Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 19-32.
- [16] 郑克棬, 陈梓慧. 地热供暖世界现状及中国清洁供暖的地热选择[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(2): 102-107.
ZHENG Keyan, CHEN Zihui. World status of geothermal space heating and geothermal option in China's clean heating [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(2): 102-107.
- [17] 罗佐县, 刘芮, 宫昊, 等. 中国地热产业发展空间分析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(4): 40-47.
LUO Zuoxian, LIU Rui, GONG Hao, et al. The development space of geothermal industry in China [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(4): 40-47.
- [18] 薛颀. 浅层地热能高效换热技术研究[J]. 科学技术创新, 2022, 36(7): 143-146.
XUE Qi. A Study on efficient heat exchange technology for shallow geothermal energy[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022, 36(7): 21-25.
- [19] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [20] 王文中, 邵东云, 程新科, 等. 中国浅层和中深层地热能开发和利用[J]. 水电与新能源, 2022, 36(3): 21-25.
WANG Wenzhong, SHAO Dongyun, CHENG Xinke, et al. Development and utilization of the Shallow and middle-deep geothermal energy in China[J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(3): 21-25.
- [21] 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.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientist Sinica, 2017, 38(4): 449-459.
- [22] 袁健灵, 余跃进, 曾繁博, 等. 某地源热泵工程案例的技术经济性分析研究[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2017, 17(4): 66-70.
YUANG Jianling, YU Yuejin, ZENG Fanbo, et al. The technical and economic evaluation research of ground source heat pump system in Nanjing area as an example [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology edition), 2017, 17(4): 66-70.
- [23] 尤伟静, 刘延锋, 郭明晶. 地热资源开发利用过程中的主要环境问题[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 24-28, 34.
YOU Weijing, LIU Yanfeng, GUO Mingjing. Environmental issues in the development and utilization of geothermal resources [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(2): 24-28, 34.
- [24] 罗佐县, 高珊珊, 孙庆丰, 等. 夏热冬冷地区浅层地热能开发利用路径初探[J]. 当代石油石化, 2020, 28(9): 7-14.
LUO Zuoxian, GAO Shanshan, SUN Qingfeng, et al. A preliminary study on the development and utilization path of shallow geothermal energy in hot summer and cold winter areas[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(9): 7-14.
- [25] 黄璜, 刘然, 李茜, 等. 地热能多级利用技术综述[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 1-10.
HUANG Huang, LIU Ran, LI Qian, et al. Overview on multi-level utilization techniques of geothermal energy[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 1-10.
- [26] 王永真, 韩恺, 赵军, 等. 地热发电在新型电力系统中的定位及参与模式[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 58-65.
WANG Yongzhen, HAN Kai, ZHAO Jun, et al. Orientation and participation mode of geothermal power generation in the new power system [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 58-65.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

姜曙(1979), 男, 正高级工程师, 硕士, 从事能源高效利用和建筑节能方面的研究, asfar@haue.edu.cn。