

山西地热能开发无干扰供热先导试验研究与实践

霍峰森¹, 郜一臻¹, 荆京², 赵福金², 郭威²

(1. 山西地质集团有限公司, 山西太原 030006; 2. 山西省地质工程勘察院有限公司, 山西太原 030024)

摘要:地热能开发利用对实现节能减排、绿色低碳发展具有重要意义。针对山西浅层高温地热田无干扰供热技术无应用先例、技术体系不完善等问题,通过研究试验区地质特征,集成钻探工艺、井下换热、供热控制等关键技术,提出了山西浅层高温地热田开发利用无干扰供热先导试验技术思路。试验表明:钻探试验井井深295.72 m,井底温度经测109.9℃,采用无干扰井下换热供热技术,系统循环流量16.90 m³/h,即可满足面积2500 m²临建供热需求,室内平均温度22℃。无干扰供热先导试验在山西浅层高温地热田试验成功,现场供暖效果良好,试验成果为山西浅层高温地热田开发利用提供了宝贵经验和 technical 支撑。

关键词:地热能;浅层高温地热田;开发利用;无干扰供热;钻探工艺;先导试验

中图分类号:P634;TK529 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)01-0138-07

Research and practice on pilot test of non-interfering heating in Shanxi geothermal energy development

HUO Fengsen¹, XI Yizhen¹, JING Jing², ZHAO Fujin², GUO Wei²

(1. Shanxi Geological Group, Taiyuan Shanxi 030006, China; 2. Shanxi Geological Engineering Exploration Institute Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: The development and utilization of geothermal energy is of great significance for achieving energy conservation, emission reduction, and green and low-carbon development. In response to the problems of no application precedent and incomplete technical system of non-interfering heating technology in Shanxi shallow high-temperature geothermal fields, a pilot test technology for the development and utilization of non-interfering heating in Shanxi shallow high-temperature geothermal fields is proposed by studying the geological characteristics of the experimental area, integrating key technologies such as drilling technology, underground heat exchange, and heating control. The experiment shows that the drilling test hole has a depth of 295.72m, and the temperature at the bottom of the well has been measured to be 109.9℃. Using non-interference underground heat exchange and heating technology, the system has a circulating flow rate of 16.90m³/h, which can meet the heating needs of a temporary building with an area of 2500m² with an average indoor temperature of 22℃. The non-interference heating pilot test was successful in the shallow high-temperature geothermal field in Shanxi, and the on-site heating effect was good. The test results provide valuable experience and technical support for the development and utilization of shallow high-temperature geothermal fields in Shanxi.

Key words: geothermal energy; shallow high-temperature geothermal field; development and utilization; non-interfering heating; drilling technology; pilot test

收稿日期:2024-05-11; 修回日期:2024-06-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.01.019

基金项目:山西地质集团2022年企业发展基金项目“山西高温地热资源开发利用科研示范基地无干扰地热供热先导性试验

第一作者:霍峰森,男,汉族,1970年生,正高级工程师,探矿工程专业,长期从事钻探技术研究与应用工作,山西省太原市小店区师范街14号, sxdzjtsafe@126.com。

通信作者:郜一臻,男,汉族,1989年生,工程师,探矿工程专业,长期从事钻探技术研究与应用工作,山西省太原市小店区师范街14号, 839563740@qq.com。

引用格式:霍峰森,郜一臻,荆京,等.山西地热能开发无干扰供热先导试验研究与实践[J].钻探工程,2025,52(1):138-144.

HUO Fengsen, XI Yizhen, JING Jing, et al. Research and practice on pilot test of non-interfering heating in Shanxi geothermal energy development[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 138-144.

0 引言

我国地热资源的蕴藏量巨大,全国陆域资源量为856万亿t标准煤,根据国际标准,以其2%作为可采资源,可采资源量达17万亿t标准煤^[1]。全国地级以上城市浅层地热能年可开采资源量折合7亿t标准煤;全国水热型地热资源量折合1.25万亿t标准煤,年可开采资源量折合19亿t标准煤。地热资源的发展前景非常广阔。国家发展改革委、国家能源局、自然资源部等八部委出台《关于促进地热能开发利用的若干意见》(国能发新能规[2021]43号),重点任务之一为“鼓励各地在进行资源评估、环境影响评价和经济性测算的基础上,根据实际情况选择‘密封式、无干扰井下换热’技术,最大程度减少对地下土壤、岩层和水体的干扰,确保地下水水量不减少、水位不下降、水质不降低,避免对地下水资源和环境造成损害。”根据区域地热地质调查,山西省天镇县水桶寺—马圈库一带浅层松散层地温异常区,地温梯度可达到7℃/100m,该区域的地热资源可以作为无干扰供热先导试验的应用热源。但目前无干扰供热技术,在山西范围内仅应用于中深层钻井,尚未在浅层钻井中应用^[2-5]。山西地质集团组织开展“山西高温地热资源开发利用科研示范基地无干扰地热供热先导性试验”项目,填补了无干扰供热技术在山西浅层高温地热田开发利用的空白。该技术无污染,不受地面气候等条件的影响,能有效保护地下水资源,实现地热能资源的清洁、高效、持续利用^[6-8]。无干扰供热试验需集成钻探工艺、井下换热、供热控制等技术,亟需开展研究探索^[9-16]。为解决无干扰供热试验技术难点,本文系统梳理了山西高温地热资源开发利用科研示范基地无干扰供热先导试验与实践,形成了一套浅层高温地热田无干扰供热技术体系,为今后同类型地热能开发利用提供了宝贵经验和 technical 支撑。

1 试验区基本情况

1.1 地质概况

山西浅层高温地热田开发利用无干扰供热先导试验区位于华北北缘板内活动带和林格尔丰镇板隆天镇-阳高块凸,阳高-天镇盆地最早于上新世中晚期开始发育,盆地内沉积物直接覆盖在下伏的变质基底之上。在水桶寺、马圈库形成两处太古界变质岩地垒隆起区,并伴随基底有多起燕山期花岗

岩、辉绿岩脉侵入。盆地区域性深大断裂构造延伸下切,沿深大断裂浅部发现有火成岩体侵入,深大断裂是沟通浅深部热源的有利通道,将地下深处高温流体通过大型构造断裂传导上来,圈闭形成地热异常区。试验区地层为第四系冲洪积物覆盖,下伏新近系保德组,基底为太古代葛胡窑片麻岩,该区域地热储层特点是埋藏浅,温度高,深部岩体温度为150~300℃。

1.2 地温场特征

华北北缘板内活动带中段天镇弧山庙-阳高块凸,是山西省有名的地热异常区。自1970年代以来,在区内及其周边相继发现并打出了热水井。浅层高温地热田无干扰供热先导试验项目区位于天镇盆地云门山山前大断裂洪积倾斜平原地带,试验井所揭露的热储层为天镇地热异常区上部第二热储层,即为松散岩类热储层。热储层上部地层为第四系更新统,下部为第三系保德组地层。热储层含水层富水性及厚度上部优于下部,热储层厚度200~300m,地热流体涌水量20~60m³/h,地层温度自上而下25~110℃,区域地层平均地热增温率7℃/100m,出口水温50~100℃。

1.3 试验选址

山西高温地热资源开发利用科研示范基地位于马圈库地热田,属浅层高温地热田,该地热田热储层温度高、地温梯度大,且基地内部建筑物冬季具有供暖需求。在基地西北侧钻探一眼先导试验井(WSY-1井),下入井下换热试验管柱,运用无干扰供热技术提取地下热能。通过建设基地内部供热地面工艺流程,对基地2500m²的建筑物进行无干扰供热先导试验。

2 试验井结构及地温特征

2.1 试验井施工工艺

无干扰供热WSY-1先导试验井钻探施工采用车载SPC-1000型钻机,钻井液正循环、机械回转工艺,Φ311.1mmPDC钻头钻进成井。

钻遇地层岩性为土质、砂质含少量砾石,未胶结,地层结构较为松散、破碎。钻进施工过程中采用低固相钻井液护壁,有效防止井内不稳定地层坍塌、掉块。

2.2 成井结构

试验井完井深度295.72m,完井口径Φ311.1

mm,最大井斜角0.96°,满足成井规范要求。采用 $\varnothing 177.8\text{ mm}\times 8.05\text{ mm}$ 钢级为J55的石油套管完井,套管底部安装同径聚能装置,下深295.42 m,井身结构见表1。

表1 WSY-1先导试验井井身结构
Table 1 WSY-1 pilot test well structure

施工口径/mm	井深/m	套管规格/mm	下管深度/m	止水位置/m
311.1	0~295.72	$\varnothing 177.8\times 8.05$	0~295.42	50~295.42
石油套管				

在套管外填入规格为4.0~6.0 mm,直径均匀、磨圆度较高的砾料,砾料深度50.0~295.42 m,填入量 12.6 m^3 ;砾料上部至井口填入规格为3.0~4.0 mm的粘土球止水,填入量 2.6 m^3 。在套管外壁和井壁之间填砾止水,可以保证套管和地层之间的接触和传热。

2.3 井温测试

试验井完井后,进行井温(TEP)测试工作。

测试结果显示:井深295.72 m,井底最高温度 $109.9\text{ }^\circ\text{C}$,地温曲线呈直线型,符合传导聚热特征,平均地热增温率 $37.2\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$,为水热型地热资源,满足无干扰供热先导试验需求,见图1。

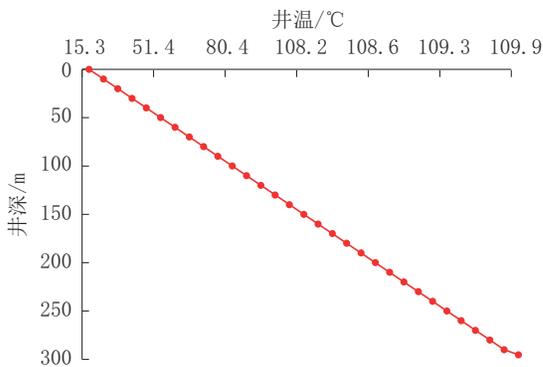


图1 WSY-1先导试验井温度曲线(TEP)

Fig.1 Temperature curve (TEP) of WSY-1 pilot test well

2.4 试验管柱结构

在WSY-1先导试验井套管内下入同轴无干扰供热试验管柱,管内同轴下入 $\varnothing 110\text{ mm}\times 10.0\text{ mm}$ 材质为耐高温聚丙烯中心管,上部连接 $\varnothing 114.3\text{ mm}\times 6.35\text{ mm}$ 钢级为J55高应力管(具有隔热涂层)至井口,地面安装采灌复合标准化井口装置完井。为增加热交换能力,提高井下换热效率,底部

安装聚能装置。聚能装置为金属换热器,外管采用耐压的特制钢管,导热系数 $>90\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$,抗拉强度 $>1500\text{ kN}$,承压系数 $>16\text{ MPa}$,内管采用高热阻管材,通过管内介质进行取热。见表2、图2。

表2 WSY-1先导试验井试验管柱结构

Table 2 String structure of WSY-1 pilot test well

口径/mm	井深/m	套管直径/mm	套管深度/m	中心管直径/mm	高应力管直径/mm
311.1	295.72	177.8	295.42	110	114.3

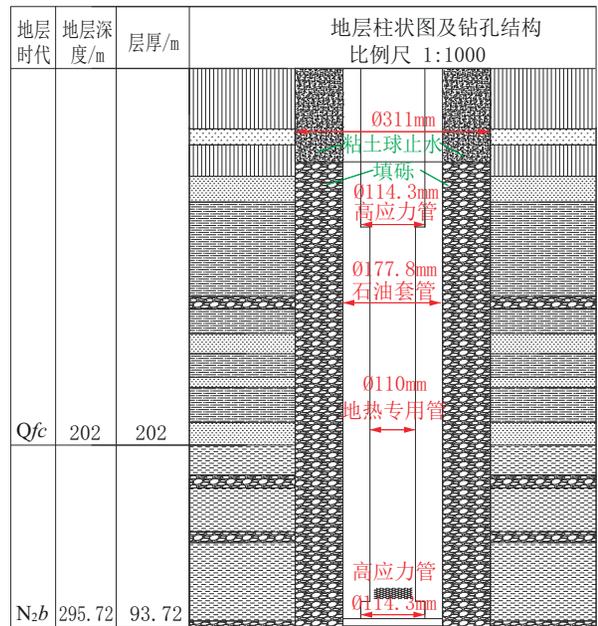


图2 地层柱状图及管柱结构

Fig.2 Stratigraphic column and string structure

3 无干扰供热先导试验

浅层无干扰供热先导试验,是一种闭式循环的井下换热系统。在高温地热井中通过同轴试验管柱进行单井内部流体循环,基于热传导的方式与地层换热,从而以“取热不取水”形式开发地热能^[10-16],其原理见图3。

3.1 工艺流程

无干扰供热先导试验地面工艺流程分为3部分,即无干扰热源井区、能源站区、用户端采暖区,工艺流程见图4。

将经过软化水装置软化后的低温水注入WSY-1无干扰热源井,通过井下聚能装置将地层中的热能导出,使低温水加热为高温水,在能源站区将高温水泵送至基地用户端采暖区供暖,见图5、图6。

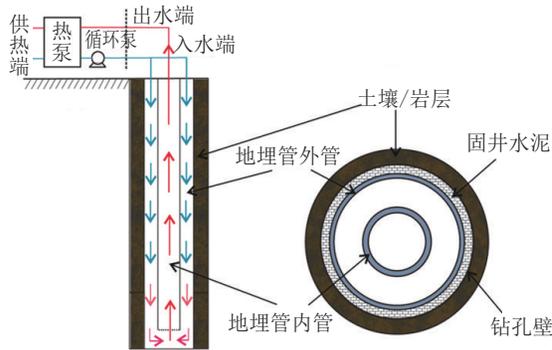
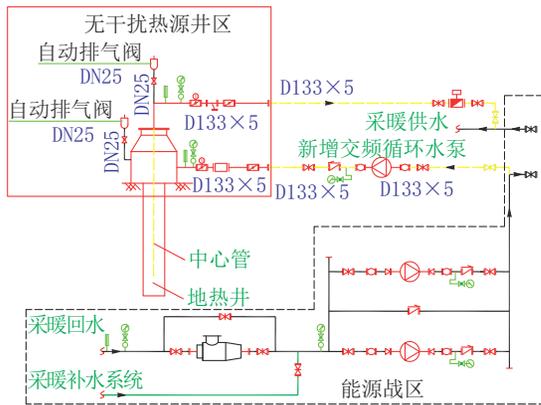


图 3 无干扰地热“取热不取水”原理

Fig.3 Principle diagram of non-interfering geothermal “taking heat rather than water”



- 图例
- ☑ 手动蝶阀
 - ⊕ 自动排气阀
 - ⊗ 橡胶软接头
 - ▭ 热量表
 - ⊕ 电动蝶阀
 - ⊕ 电磁流量计
 - ⊕ Y型过滤器
 - ⊕ 止回阀
 - ⊕ 闸阀
 - ⊕ 球阀
 - ⊕ 温度计
 - ⊕ 压力表

图 4 无干扰供热先导试验工艺流程

Fig.4 Process flow diagram of pilot test for non-interfering heating



图 5 无干扰供热试验井区

Fig.5 Well area of non-interfering heating test

在无干扰地热供热 WSY-1 井进水管上设置一个电磁冷热流量计、电磁流量计,在进水管和出水管各设一个温度传感器,精度为 0.2%,进出口温度、压力同时设置机械表监测。试验用管道离心泵型



图 6 换热站区

Fig.6 Heat exchange station area

号为 ZQLR80-250B,电机功率 15 kW,扬程 60 m,额定流量 43.3 m³/h。试验中,通过管道离心泵变频来控制系统循环水流量,在进出水管上监测循环水的温度、流量、压力,见图 7。



图 7 电磁冷热流量计、电磁流量传感器

Fig.7 Electromagnetic cold and hot flow meter and electromagnetic flow sensor

3.2 建筑末端特征及热负荷需求

无干扰供热先导试验的供热对象是山西高温地热资源开发利用科研示范基地内部临时建筑物,用户端供暖面积 2500 m²,其中宿舍砖混结构 480 m²,办公生活彩钢临建房 1070 m²,发电及水处理彩钢厂房 950 m²。办公生活区及发电水处理厂房采用 100 mm 厚防火保温岩棉,室内布设钢制复合散热器。

建筑物冬季供暖负荷的具体计算方法参照《民

用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012)第4章、第5章的规定。按建筑物的暖通建设与气象资料及建筑墙体计算,山西高温地热资源开发利用科研示范基地临时建筑热负荷 80 W/m^2 ,当室外温度在 $-30\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,基地用户采暖需求热量值为 160.0 kW/h 。

3.3 试验方式与评价

山西高温地热资源开发利用科研示范基地无干扰供热先导试验采用直接供暖、模拟降温两种供热方式分别进行试验与实践。

3.3.1 直接供暖方式

供热系统循环水通过 WSY-1 试验井井下换热,经过能源站直供系统泵送至用户端采暖,采用单井直供循环,通过调整变频泵频率,控制系统循环水流速及系统压力。

3.3.1.1 循环流量与换热强度的关系

流量是决定无干扰井下换热产能的重要因素。试验通过调节管道泵频率,分别设置 $16.90\text{ m}^3/\text{h}$ (20 Hz)、 $25.62\text{ m}^3/\text{h}$ (30 Hz)、 $34.59\text{ m}^3/\text{h}$ (40 Hz)、 $39.50\text{ m}^3/\text{h}$ (46 Hz)进行换热强度对比分析。最终得出流量-换热强度相关关系图,见图8。

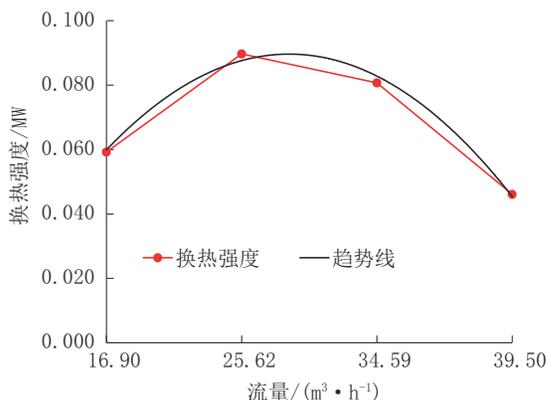


图8 流量-换热强度相关关系

Fig.8 Correlation diagram between flow rate and heat transfer intensity

随着流量的增加,换热强度起初明显增加,但继续增加后,降低幅度较大。控制系统循环水流速为 $30.0\text{ m}^3/\text{h}$ 井内换热强度最高,换热强度 0.090 MW 。

3.3.1.2 循环流量与产热量的关系

调节循环流量进行产热量对比分析,最终得出流量-产热量相关关系图,见图9。

随着流量的增加,产热量起初增加幅度较大,

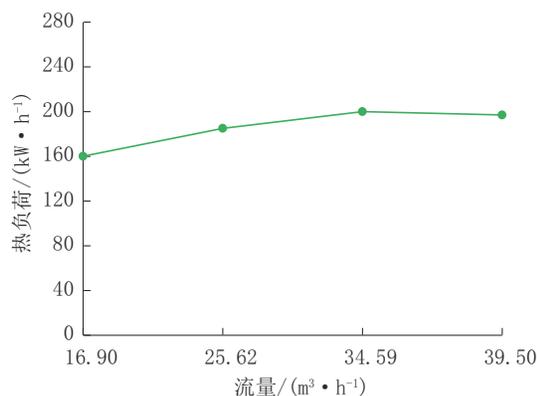


图9 流量-产热量相关关系

Fig.9 Flow rate heat production correlation diagram

但继续增加后,基本平稳甚至降低,表明产热量已经达到最大值,最大产热量 200.0 kW/h 。

3.3.1.3 循环流量与进出口温差的关系

调节循环流量进行进出口温差对比分析,最终得出流量-温差相关关系图,见图10。

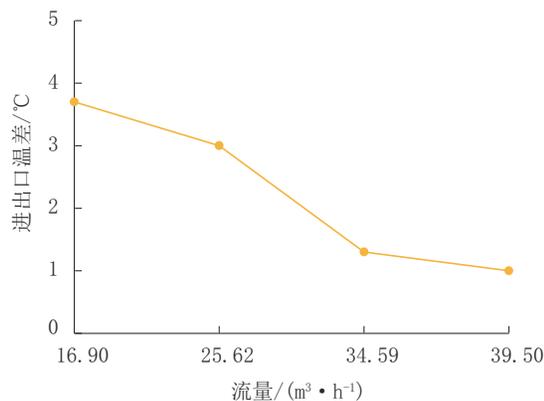


图10 流量-进出口温差相关关系

Fig.10 Correlation diagram of flow rate and inlet/outlet temperature difference

随着流量的增加,进出口温差逐渐减少,间接表明流速增加,过流速度增大导致井内换热下降,热散失减少。

综合以上直供方式试验结果分析,得出试验数据见表3。

通过无干扰供热直供方式试验,供暖面积 2500 m^2 。系统循环流量 $16.90\text{ m}^3/\text{h}$,即可满足基地临建供暖需求,进水温度 $47\text{ }^\circ\text{C}$,出水温度 $50.7\text{ }^\circ\text{C}$,室内平均温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.3.2 模拟降温方式

因基地建筑物面积及总热负荷有限,采用人为

表3 直供方式试验数据

Table 3 Test data sheet for direct supply mode

变频泵频率/Hz	循环流量/(m ³ ·h ⁻¹)	换热强度/MW	产热量/(kW·h ⁻¹)	进出口温差/°C
20	16.90	0.0592	160.1	3.7
30	25.62	0.0897	185.0	3.0
40	34.59	0.0807	200.0	1.3
46	39.50	0.0461	197.0	1.0

降低入水温度的方式进行模拟无干扰地热供热试验。

采用基地原有晾水池作为蓄水池(蓄水池尺寸:25 m×50 m×1.7 m),人为调节蓄水池内总水量、水温,控制进水温度。下入大扬程潜水泵,抽取晾水池内不同温度的水源,并通过调整变频泵,控制水流速及系统压力,达到模拟不同入水温度、不同流速条件下的无干扰供热先导试验的目的,结果见表4。

表4 模拟降温方式试验数据

Table 4 Test data sheet of simulated cooling method

试验方式	循环流量/(m ³ ·h ⁻¹)	进水温度/°C	出水温度/°C	进出口温差/°C	换热强度/MW	产热量/(kW·h ⁻¹)
低流速/低流量无干扰供热	20	6.0	15.0	9.0	0.2100	209.3
	21	18.0	26.5	8.5	0.2083	207.6
	19	22.0	30.5	8.5	0.1884	187.8
	19	30.0	38.0	8.0	0.1773	176.8
	19	44.0	48.0	4.0	0.0887	88.4
高流速/高流量无干扰供热	34	5.0	11.0	6.0	0.2380	237.5
	35	16.0	21.5	5.5	0.2246	223.9
	34	24.5	30.2	5.7	0.2261	225.4
	32	34.0	39.5	5.5	0.2053	223.3
	32	42.0	47.0	5.0	0.1867	186.1
	33	46.0	51.0	5.0	0.1925	191.9

低流速、高流速两种无干扰供热试验中,进水温度越低,进出口温差越大,换热强度越高,产热量越大。循环水流量34.0 m³/h条件下,单井的最大换热量可以稳定在为223.3~237.5 kW/h。

3.4 试验总结

山西高温地热资源开发利用科研示范基地已实现无干扰供热。基地供热面积2500 m²,因建筑物面积及总热负荷有限,出口温度较高,采用直供方

式,极寒天气室内温度为22~23℃。采用模拟降温方式进行无干扰供热试验,得出单井最大产热量为223.3~237.5 kW/h。

按照与试验井情况相同条件下,为常规(住宅)居民建筑标准(地暖管采暖),国家强制节能系数要求40 W/m²,WSY-1井单井可供热面积5937.5 m²,见表5。

表5 单井供热能力

Table 5 Heat supply capacity of a single well

类别	热负荷/(W·m ⁻²)	供热能力/m ²
临建单位建筑面积热负荷指标(W/m ²)	40	5937.5

4 结论

(1)山西地热能开发利用无干扰供热技术在山西高温地热资源开发利用科研示范基地成功试验与实践。供暖面积2500 m²,采用直供方式,冬季极寒天气室内温度为22~23℃;

(2)在天镇县与试验井情况相同条件下,按照常规(住宅)居民建筑标准,国家强制节能系数要求40 W/m²,单井可供热面积5937.5 m²;

(3)无干扰供热先导试验对山西浅层高温地热田的成功开发利用,为今后同类型清洁能源供热工作提供了宝贵经验和技术支持。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王星宇,周军莉,文远高,等.中深层地热用埋管换热器研究利用进展[J].建筑热能通风空调,2022,41(2):46-49,45.
WANG Xingyu, ZHOU Junli, WEN Yuangao, et al. Research progress of buried pipe heat exchanger in middle and deep geothermal land[J]. Building Energy & Environment, 2022,41(2):46-49,45.
- [3] 张秋冬,邢向渠,张新春,等.无干扰中深井换热系统及完井工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):62-65.
ZHANG Qiudong, XING Xiangqu, ZHANG Xinchun, et al. Interference-free heat exchange system and completion technology for mid-deep to deep wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):62-65.
- [4] 杜垚森,封优生,伍晓龙,等.深部地热开发保温管技术研究现状及发展趋势[J].钻探工程,2022,49(6):138-145.
DU Yaosen, FENG Yousheng, WU Xiaolong, et al. Research

- status and consideration of thermal insulation pipe technology for deep geothermal energy development[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(6):138-145.
- [5] 李奉翠, 韩二帅, 梁磊, 等. 中深层地热井下同轴换热器长期换热性能研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2):194-201.
LI Fengcui, HAN Ershuai, LIANG Lei, et al. Long-term heat transfer performance of underground coaxial heat exchanger for medium-deep geothermal[J]. *Coal Field Geology & Exploration*, 2021, 49(2):194-201.
- [6] 卜宪标, 冉运敏, 王令宝, 等. 单井地热供暖关键因素分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(5):957-964.
BU Xianbiao, RAN Yunmin, WANG Lingbao, et al. Analysis of key factors affecting single well geothermal heating[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(5):957-964.
- [7] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12):4741-4752.
KONG Yanlong, CHEN Chaofan, SHAO Haibing, et al. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12):4741-4752.
- [8] 鲍玲玲, 徐豹, 王子勇, 等. 中深层同轴套管式地理管换热器传热性能分析[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(4):1217-1222.
BAO Lingling, XU Bao, WANG ZI Yong, et al. Heat transfer performance analysis of the middle-deep coaxial casing ground heat exchanger[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(4):1217-1222.
- [9] 陈浩, 赵华宣, 贾玉川, 等. 贵州岩溶疏干区浅层地热能地理管施工技术[J]. *钻探工程*, 2021, 48(3):170-177.
CHEN Hao, ZHAO Huaxuan, JIA Yuchuan, et al. Placement of shallow geothermal heat pipes in the dewatered karst area of Guizhou province [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3):170-177.
- [10] 卢玮, 尚永升, 申云飞. 浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计——以郑州市浅层地热能示范工程为例[J]. *钻探工程*, 2022, 49(3):146-153.
LU Wei, SHANG Yongsheng, SHEN Yunfei. Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system: Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3):146-153.
- [11] 李寿臣, 祁福利, 薛军, 等. 一种寒区地热能高效换热器的研制[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10):275-277, 286.
LI Shouchen, QI Fuli, XUE Jun, et al. Development of geotemperature energy heat exchanger in cold regions[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10):275-277, 286.
- [12] 黄帅, 孙苏雨婷, 董建锴, 等. 中深层地理管换热器周围岩土热恢复特性[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(6):842-850.
HUANG Shuai, SUN Su yuting, DONG Jiankai, et al. Heat recovery characteristics of rock and soil around medium-deep borehole heat exchanger[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(6):842-850.
- [13] Wood C J, Liu H, Riffat S B. Comparative performance of "U-tube" and "coaxial" loop designs for use with a ground source heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 37:190-195.
- [14] 唐万举. 东胜气田井下真空隔热油管工艺应用效果分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(4):57-60.
TANG Wanju. Analysis on application effect of downhole vacuum insulated tubing in Dongsheng gas field[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(4):57-60.
- [15] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century* [M]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [16] Cuenot N, Faucher J P, Fritsch D, et al. *The European EGS project at Soultz-sous-Forêts: From extensive exploration [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-8.

(编辑 王文)