

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-826-08

成都某综合交通枢纽 浅层地源热泵埋管热物性分析与系统评价

王胜男^{1,2} 周志强² 曾超¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

【摘要】 基于成都某综合交通枢纽南北场咽喉区开展地质勘察数据, 并对其开展岩土热响应试验分析与评价。地勘结果表明, 工程区地下水类型主要为基岩裂隙承压水, 地下水的渗流作用加强了热量交换速率, 使测试得到的岩土体的综合热换功率值偏大, 地下水对埋管式地源热泵系统的运行较为有利。工程区的岩土体双 U 平均导热系数平均值为: 2.45~2.78W/(m·K), 所在地的岩土体 (深度 110m 内) 初始平均温度为 18.32℃。各试验孔中, 双 U 形式的埋管换热功率均大于单 U 形式的换热功率, 换热功率提高约 22%。从测试效果和经济角度出发, 结合四孔联合测试工况, 建议选用双 U25 埋管, 夏季标准工况释热能力为 42.89W/m, 冬季标准工况取热能力为-42.66W/m。全年动态负荷计算分析结果表明, 站房部分由可再生能源提供的空调冷热负荷比例可达 32.1%, 枢纽部分由地源热泵系统提供的空调冷热负荷比例可达 21.5%。该研究成果可为在轨道交通领域推进浅层地热能利用提供可靠的技术路线及理论依据。

【关键词】 综合交通枢纽; 地源热泵; 热响应试验; 双 U25 埋管

中图分类号 TU 831 文献标识码 A

System Evaluation and Thermal Physical Properties Analysis of Shallow Ground Source Heat Pump Buried Pipes in a Comprehensive Transportation Hub in Chengdu

Wang Shengnan^{1,2} Zhou Zhiqiang² Zeng Chao¹

(1. School of Mechanical engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In this paper, geological investigation is carried out in the throat area of the north and south field of a specified comprehensive transportation hub and the geotechnical thermal response test is analyzed and evaluated. The geological survey results show that the groundwater in the project area is mainly confined water in bedrock fractures. The seepage effect of groundwater strengthens the heat exchange rate, which makes the comprehensive heat transfer power value of the rock and soil mass obtained by the test larger. The groundwater is more favorable to the operation of the buried piped ground source heat pump system. The average double-U thermal conductivity of rock and soil mass in the engineering area is 2.45~2.78W/(m·K), and the average initial temperature of rock and soil mass in the site (within 110m depth) is 18.32℃. In each test hole, the heat transfer power of the double-U buried pipe is greater than that of the single-U buried pipe, and the heat transfer power is increased by about 22%. From the point of view of test effect and economy, combined with the four-hole joint test condition, it is suggested to choose

作者简介: 王胜男 (1989-), 女, 在读博士研究生, 高级工程师, E-mail: wsn.314@163.com

通讯作者: 曾超 (1990-), 女, 博士后, 讲师, E-mail: chaozeng@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-30

dual buried U25 pipe, the heat release capacity of the standard condition in summer can reach 42.89W/m, and the heat recovery capacity of the standard condition in winter can reach -42.66W/m. The annual dynamic load calculation and analysis results show that the proportion of air conditioning heating and cooling load provided by the ground source heat pump system can reach 32.1% in the station part and 21.5% in the hub part. This area is rich in shallow geothermal energy resources, and the test data can provide theoretical basis for the later design.

【Keywords】 comprehensive transportation hub; ground source heat pump; thermal response test; double U25 ground buried pipe

0 引言

截止 2020 年末,我国铁路网已经达到了 14.63 万公里,而随着铁路网的建设发展,铁路客运站数量也迅速增加。根据“交通强国”与轨道交通跨越式发展规划,截至 2025 年,城市轨道交通运营里程将增至 10000 公里,枢纽机场轨道交通介入率 80%。目前的客运站为了满足人们舒适性的要求,实现客运站冬暖夏凉,一般在夏季采用冷水机组进行制冷而在冬季采用市政热网或锅炉进行制热。随着国家“30, 60”政策的推行,需要深入分析绿色低碳转型面临的关键制约,围绕能源绿色低碳转型,开展交通领域能源降碳增效关键技术研究。

地源热泵技术是利用浅层地热资源作为冷热源的可再生能源利用技术,比起传统的燃煤锅炉制热以及冷水机组制冷的的方式有较多优势^[3]。地源热泵技术可以利用地下浅层地热资源(通常小于 400m 深)来实现冬季供热,并且在夏季将室内的热量带入地下土壤中来实现制冷,地源热泵技术利用的土壤温度冬季为 12-22℃,温度比室外空气温度高,热泵循环的蒸发温度提高,能效比也提高;夏季的土壤温度为 18-32℃,温度比环境空气温度低,制冷系统冷凝温度降低,机组效率大大提高,可以节省 30-40%的运行费用^[1],可有效助力室内温度的舒适性营造^[2]。

然而,地源热泵系统是一种依赖地热的高效供能技术,因此,做好地源参数的评估研究至关重要。采用岩土热响应试验的方法对地质条件、岩土热物性、换热孔的换热能力等参数进行了分析,可为地源热泵系统实施提供可行性论证^[3]。地源热泵换热效率及其运行成本受内因主要包括井型(单 U、双 U、串联、并联)、结构(井径、井深)和地埋管换热循环流量、循环进出水温度等因素的影响。因此,有必要针对特殊的水文地质条件进行热响应测试^[4]。同时,充分的环境、经济效益论证是保障该技术顺利实施的前提^[5,6]。

本文依托成都某综合交通枢纽土壤源地源热泵项目,开展热响应试验分析与评价,基于测试结果及经济角度提出推荐的换热器形式。在此基础上,分析全年空调能耗中可再生能源利用率。该研究成果可为在轨道交通领域推进浅层地热能利用提供可靠的技术路线及理论依据。

1 工程概况

1.1 建筑布置

综合交通枢纽土壤源地源热泵项目位于成都市,是以铁路为核心,配套地铁、公交、长途、出租车、社会车、网约车为一体的特大型综合交通枢纽,站房主体为地下两层、地上三层(见图 1)。天府站总规模 61.2 万平方米,其中站房工程 12.02 万平方米、站区工程 6.57 万平方米、成自停车场 4.38 万平方米、市政配套工程 38.23 万平方米。



图 1 天府站鸟瞰效果图

Fig.1 Aerial view of the Tianfu Station

1.2 地源热泵系统勘察设计

天府站地源热泵系统设置于天府站南北场咽喉区左侧 23~857m,地块承狭长形,共分 A(站房地源热泵用地区域)、B(枢纽地源热泵用地区域)两块区域。A 块用地面积为 24000m²,按照孔间距 4.0m×4.0m,地埋管孔数为 1180 个,埋深为 100m; B 块用地面积 26000m²,按照孔间距 4.0m×4.0m,地埋管孔数为 1400 个,埋深为 100m。为了探究地源热泵区域工程地质条件,按照以下原

则设置勘察孔^[7]:

(1) 数量: 勘探孔的数量不应低于设计孔数或预计孔数的 1%;

(2) 平面布置: 勘探孔宜沿场区对角线长轴布设, 勘探孔间距为 50~100m。当对角线短向大于 50m 时, 勘探孔应沿两条交叉的对角线布置;

(3) 孔深: 勘探深度应大于预计地埋管底标高 5m。

依据上述原则, 本次勘察共布置勘察孔 26 个, 热响应试验孔 14 个。其中站房地源热泵用地区域勘察孔 13 个 (A01-A13), 热响应试验孔 6 个; 枢纽地源热泵用地区域勘察孔 13 个 (B01-B13), 热响应试验孔 8 个, 枢纽区域增设四孔联合测试工况, 孔间距取 4.0m×4.0m。勘察孔布置情况详见图 2。

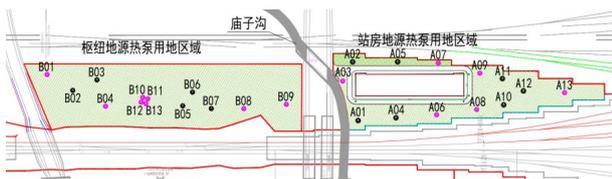


图 2 地源热泵用地区域与钻孔情况

Fig.2 Site area and borehole description for the ground source heat pump system

1.3 岩土热响应试验方案

按照《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366-2005, 2009 年版) 中规定, 采用向岩土施加一定加热功率的方式, 可进行岩土热物性参数的测试。本项目采用恒热流法^[8]进行测试, 基于提出的岩土热物性数据, 模拟地下岩土层以及回路中温度的短期、中期 (1 年) 和长期 (多年) 的变化, 按设计规范计算得到地埋管换热器的总长度。

具体地, 本次热物性测试的时间应为 36~48h, 加热功率应为每米钻孔 30~80W, 大致为实际 U 型管换热器高峰负荷值。

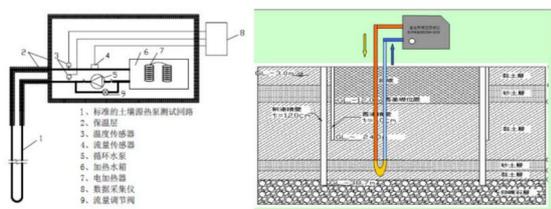


图 3 热响应试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of thermal response test

本次试验设备采用组合式热响应测试仪, 试验

仪器主要有热泵系统、电加热器、补水箱、循环泵、循环管路、温度和流量检测元件等组成, 原理图及主要构件图见图 3、图 4。地埋管供水管处安装流量计, 供、回水管及循环管路均布置有温度检测点, 用于自动记录管路中循环水的流量和温度。热响应测试现场见图 5。



图 4 组合式热响应测试仪示意图

Fig.4 Schematic of the combined thermal response tester



图 5 热响应试验现场图片

Fig.5 Site picture of the thermal response test

本次岩土热响应试验孔共 14 个, 为了探究不同埋管形式差异, 做单 U 与双 U 两种热响应试验, 本次勘察共布置单 U32 热响应试验孔 3 个、双 U25 热响应试验 10 个、双 U32 热响应试验 1 个, 见表 1。需做单 U 与双 U 两种热响应试验, 将结果进行对比分析, 以研究不同埋管方式的换热效率、不同深度对换热量的影响等。主要获取导热系数、容积比热容、单位深度钻孔总热阻、热扩散系数、初始平均地温等参数。测试方法、测试装置、测试钻孔及测试报告需满足《地埋管地源热泵岩土热响应试

验技术规程》T/CECS 730-2020 中相关规定^[9]。测 进行。

试孔响应测试工作于 2022 年 8 月 14 日至 9 月 1 日

表 1 测试井数据统计表

Table 1 Statistical table of test well data

试验孔编号		B01	A03、A07、A08、B04、B08、B09、B10、 B11、B12、B13	A06、A09、A13
试验井	形式	双 U 型	双 U 型	单 U 型
	垂直井深 (m)	110.0	110.0	110.0
	垂直管全长 (m)	444.0	444.0	222.0
	回填材料	水泥 30%、细砂 70%混合浆, 导热系数 2.4(W/m·K)		
	安装方法	机械自重下管		
	井口直径 (mm)	180.0	180.0	180.0
PE 管	高密度聚乙烯管 HDPE100			
	外径	32.0	25.0	32.0
	内径	26.0	20.4	26.0
连接管	20mm 厚橡塑保温材料			
	供水管段 (m)	0.5	0.5	0.5
	回水管段 (m)	0.5	0.5	0.5
	连接管全长 (m)	1.0	1.0	1.0
	保温材料	20mm 厚橡塑保温材料		

2 热物性参数测试结果及分析

2.1 地质岩土物性参数分析

勘察区地质构造分区属于断陷构造盆地, 场区构造单一, 地势较缓, 无断层、褶皱等通过。勘察区内沟渠纵横, 均属于岷江水系, 主要溪沟为庙子沟, 自南向北流经工程用地征红线范围西北角, 为场区的泄洪通道。庙子沟全长 7.99km, 沟宽 2~6m, 主沟床坡度 3‰~10‰, 勘察期间水深约 0.5m, 枯水季节流量较小, 雨季流量较大, 深度可达 1.8~2m。

项目内出露主要地层由上而下依次为: 第四系全新统人工填土层 (Q₄^{ml})、第四系全新统冲洪积 (Q₄^{al+pl}) 粉质黏土夹卵石、第四系中更新统冰水、流水堆积 (Q₃^{fg+al}) 粉质黏土夹卵石、圆砾, 下伏基岩为白垩系上统灌口组 (K_{2g}) 泥岩夹泥质砂岩, 详见图 6、图 7。地质勘察结果表明, 埋管区域以泥岩为主, 不同地勘孔内地质分布虽有差别, 但主要分布趋势相近。表面 3m 区域内以人工填土为主, 3m-10m 范围以强风化泥岩为主, 10m-110m 范围内以中风化泥岩为主, 详见图 8。



图 6 细脉状石膏

Fig.6 Vein-like gypsum



图 7 浸染状石膏

Fig.7 Impregnated gypsum

从上至下共 110 m	3.0m	人工填土(粉质黏土)
	5.9m	强风化泥岩
	20.1m	中风化泥岩
	1.9m	中风化泥质砂岩
	29.1m	中风化泥岩
	3.4m	中风化泥质砂岩
	1.8m	中风化泥岩
	13.9m	中风化泥质砂岩
	16.9m	中风化泥质
	14.0m	中风化泥岩(含石膏)

图 8 钻孔(A05)地质纵断面示意图

Fig.8 Schematic of the borehole's (A05) geological longitudinal section

同时,工程场地内浅层地下水具埋藏较浅、无稳定水位、季节性变化明显的特点,7~9月份为丰水期,10~2月份为枯水期,其余为平水期,据调查和附近已有相关经验可知,地下水丰、枯水位年变幅约 1.5~3.0m,动态变化幅度较大。补给:浅层地下水接受大气降水入渗和地表水体入渗补给,地下水具明显的丰、枯水期变化,丰水期水位上升,枯水期水位下降。深层地下水接受浅层地下水的垂向补给。在水位作用下,浅层地下水存在径流现象。浅层地下水由浅丘向沟谷低洼处径流,并随地形和岩土孔隙的不同而变化。同时,浅层地下水主要的排泄方式有潜水蒸发、向深层承压水越流。

2.2 岩土体初始平均温度分布特征分析

首先开展岩土体初始平均温度试验,将高灵敏度热感温度探头下入钻孔进行地层温度测试。数据采集仪采样间隔:0.1m,提升速度:≤6m/min,单井测试时间为 24h,测试数据后计算平均值。物探井温测试显示地表气温变化和地下由于地温梯度增温变化在 60~90m 之间达到平衡,确定钻孔深度 75m 处为恒温带的深度,因此推测工区场地 75 米以上为变温带,75 米以下为增温带。由于工区未做近似稳态测井,对上述 5 个简易测温钻孔在 60m 和 90m 深度处测量的温度取算术平均值,温度值为 18.50℃。故确定工区场地恒温带的深度为 75m,温度为 18.50℃,基本符合成都市南部台地区地温正常值。地温梯度范围在 0.31~2.50℃/100m (剔除部分异常值),适合浅层地热能开发利用。

图 9 给出了 19 个孔的岩土体平均初始温度测

试结果,可以看出,在测试条件下,经过 20min 的系统循环后,测试孔供回水平平均水温(即岩土体初始平均温度)稳定为 18.32℃。

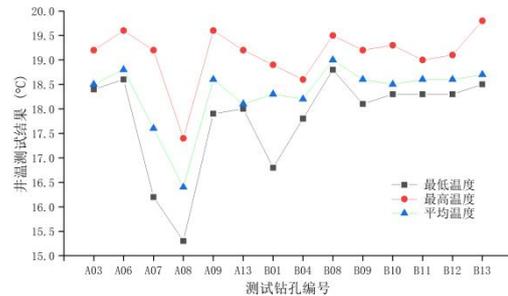


图 9 井温测试结果

Fig.9 Well temperature test results

2.3 排热试验结果分析(夏季工况)

分别开展 4kW 和 6kW 两个定功率加热工况的排热试验(模拟夏季),根据试验初步分析,定功率 6kW 加热工况的排热试验供水温度接近系统运行时供水温度,因此,拟夏季加热功率固定为 6kW。

以 B08 孔为例,模拟夏季排热恒温,试验设定供水温度 32℃,测试自 2022 年 8 月 15 日 10 时 33 分至 8 月 17 日 10 时 44 分,设定供水温度 32℃,流量 1.6m³/h,测试时间 48h。根据测试数据绘制地理供水温度与回水温度随时间变化的曲线图(见图 10)。由曲线可以看出,测试后期地理管侧供水温度、回水温度基本稳定,换热量也基本稳定(规定回水温度与 12h 以前相比温差小于 0.5℃为稳定)。取试验后期 24~48h 数据进行平均换热功率计算。

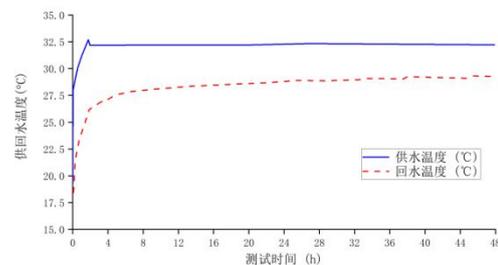


图 10 B08 测试孔在夏季恒温(32℃)工况下测试数据分析图

Fig.10 Test data analysis of the B08 test hole with inlet temperature of 32℃ in the summer condition

测试孔夏季排热量计算(设定供水温度 32℃),其中流量 G 取值 1.6m³/h,回水温度为 28.89℃,出入口温差 Δt 为 3.11℃,同时打井深度 H 为 110m。可计算单井排热量为:

$$Q = \rho \times G \times \Delta t / 0.86 = 5786 \text{ W} \quad (1)$$

单位长度排热量为:

$$\bar{Q} = Q / H = 52.60 \text{ W/m} \quad (2)$$

2.4 取热试验结果分析 (冬季工况)

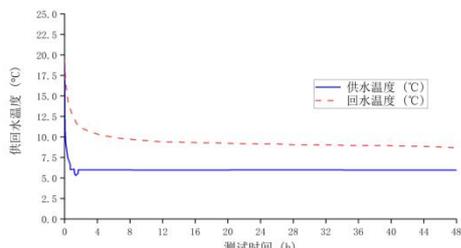


图 11 B08 测试孔在冬季恒温 (6°C) 工况下测试数据分析图

Fig.11 Test data analysis of the B08 test hole with inlet temperature of 6°C in the summer condition

以 B08 孔为例, 模拟冬季的取热恒温度, 试验设定供水温度 6°C, 测试孔模拟冬季的恒温度 (设定供水温度 6°C) 测试自 2022 年 8 月 30 日 9 时 07 分至 9 月 1 日 9 时 10 分, 设定供水温度 6°C, 流量 1.6m³/h, 测试时间 48h。根据测试数据绘制地理供水温度与出水温度随时间变化的曲线图 (见图 11)。由曲线可以看出, 测试后期地理管侧供水温度、回水温度基本稳定, 换热量也基本稳定 (人为规定回水温度与 12h 以前相比温差小于 0.5°C 为稳定)。取试验后期 24~48h 数据进行平均换热功率计算。

测试孔冬季取热量计算 (设定供水温度 6°C), 经测试, 出口水温为 8.58°C, 出入口温差 Δt 为 2.58°C。

可计算单井排热量为:

$$Q = \rho \times G \times \Delta t / 0.86 = 4800 \text{ W} \quad (3)$$

单位长度取热量为:

$$\bar{Q} = Q / H = 43.64 \text{ W/m} \quad (4)$$

根据各测试工况下单孔换热量稳态运行数据, 绘制换热量 q 随流体平均温度 T_f 的变化关系曲线 (见图 12)。可以看出, 此关系呈线性变化规律 ($R^2 > 0.99$), 与理论结果吻合较好, 说明本次实验结果可靠。

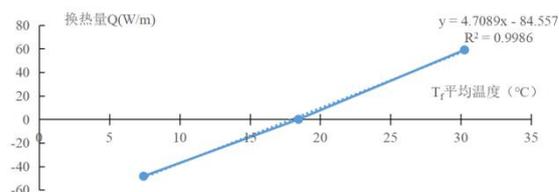


图 12 换热量 q 随平均温度的变化曲线 (B08 孔)

Fig.12 Heat exchange q versus average temperature (B08 hole)

基于上述结果, 推导各设计工况点的理论换热量 (根据 $q = 4.1334 \times T_f - 75.015$), 即可以计算单孔在不同运行温度下的换热量, 从而为地源热泵系统的进一步优化设计提供参考。按照上述测试方法, 可以得到各测试孔恒温度延米换热量, 见表 2。

表 2 岩土热响应试验测试数据统计表 (“-”表示取热)

Table 2 Statistical result of the geotechnical thermal response tests (“-” indicates heat extraction)

工况点	恒温度延米换热量 W/m		单 U32					双 U25					双 U32 四孔联合测试 W/m		
	供水均温 °C	回水均温 °C	A	A	A	平均值	A	A	A	B	B	B	平均	B	B10、B11、B12、B13
			06	09	13		03	07	08	04	08	09	值	01	
1	4	9	-42.83	-38.74	-42.31	-41.29	-49.95	-49.33	-48.19	-47.87	-47.00	-48.15	-48.42	-53.95	-46.64
2	5	10	-39.10	-35.37	-38.63	-37.70	-45.61	-45.04	-44.00	-43.71	-42.95	-44.01	-44.22	-49.24	-42.66
3	6.5	11.5	-33.52	-30.32	-33.11	-32.32	-39.09	-38.61	-37.93	-37.48	-36.88	-37.81	-37.97	-42.18	-36.69
4	30	25	35.38	32.00	34.95	34.11	41.27	40.75	39.81	39.47	38.01	38.65	39.66	44.94	36.93
5	31.5	26.5	40.97	37.06	40.47	39.50	47.78	47.19	46.10	45.71	44.09	44.85	45.95	52.00	42.89
6	37	32	61.45	55.58	60.71	59.25	71.67	70.78	69.15	68.58	66.35	67.59	69.02	77.90	64.78

从表 2 中可以看出, 以释热工况 (26.5°C -31.5°C) 为例, 单 U32 每延米换热量 39.50W/m, 双 U25 每延米换热量 45.95W/m, 双 U32 每延米换热量 52.0W/m, 换热能力依次递增。双 U25 四孔

联合测试结果表明, 会有 6.7% 的衰减, 每延米换热量降至 42.89W/m。虽然双 U32 换热效果更好, 但考虑初投资及经济性, 选取双 U25 作为本工程设计方案, 夏季标准工况释热能力为: 42.89W/m,

夏季标准工况取热能力为：-42.66W/m。

利用专业计算软件 IVRXYCS1.02，将各测试工况点的供水温度、回水温度、流量及达到稳定状态的时间等参数输入软件，可以模拟出换热量与平均温度的曲线关系^[10]，并计算获得双 U 平均导热系数平均值为：2.45~2.78W/(m·K)。四孔联做平均导热系数 2.37W/(m·K)，导热能力降低。

3 冷热源系统设计及评价

3.1 全年动态负荷分析

本文以成都地区全年 8760h 气象数据、高铁站典型日客流量变化情况为计算依据，利用 EnergyPlus 软件进行全年逐时动态负荷计算分析，计算模型详见图 13。

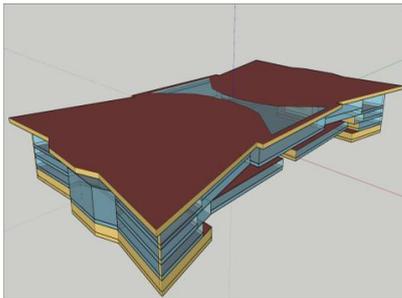


图 13 建筑模型

Fig.13 Building model

经计算，站房工程空调面积总计 92170m²，集中空调夏季设计日冷负荷为 19909kW，冬季设计日热负荷为 16154kW；市政配套工程空调面积总计 156421m²，集中空调夏季设计日冷负荷为 28515kW，冬季设计日热负荷为 12306kW。可以看出，车站全年以冷负荷为主，且持续时间长，从 3 月初持续到 10 月底。同时，3 月及 11 月出现冷热交替变换现象，冷热负荷波动较大。站房工程空调系统全年负荷变化情况见图 14，枢纽工程空调系统全年负荷变化情况见图 15。

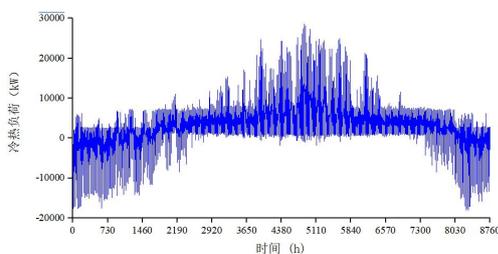


图 14 站房工程全年负荷计算结果

Fig.14 Annual cooling and heating load of the station

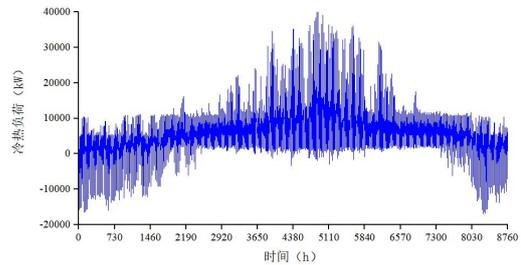


图 15 枢纽工程全年负荷计算结果

Fig.15 Annual cooling and heating load of the hub

3.2 系统设计方案及评价

按照热响应测试分析结果，评价场地埋管浅层地热能潜力。埋管钻孔的单孔占地面积按 4.0m×4.0m 计算，站房区域(A 地块)共可布设 1180 个换热孔，枢纽区域 (B 地块) 共可布设 1400 个换热孔。采用双 U25 埋管，站房地源热泵场地夏季释热量为 5061kW，冬季吸热量为 5034kW；枢纽地源热泵场地夏季释热量为 6005kW，冬季吸热量为 5972kW。同时，考虑机组供冷/热量还受到机组能效和水泵释热量、管路输配过程中热损失的影响，根据《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366-2009^[11]的规定，可根据下面两个公式计算得到地源热泵机组供冷/热量：

$$\text{总释热量} = \sum[\text{机组供冷量} \times (1 + 1/EER)] + \sum \text{输送过程得热量} + \sum \text{水泵释热量} \quad (5)$$

$$\text{总吸热量} = \sum[\text{机组供热量} \times (1 - 1/COP)] + \sum \text{输送过程失热量} - \sum \text{水泵释热量} \quad (6)$$

式中，根据设备选型情况可得， $EER=6.239$ ， $COP=5.017$ ，输送过程得失热量取 950kW（忽略冬夏季差异简化取值），水泵释热量取 160kW。

由上式计算可得，站房地源热泵机组所需供冷量为 3405kW，供热量为 5301kW；枢纽地源热泵机组所需供冷量为 4219kW，供热量为 6472kW。因此，按照冬夏均可满足设计要求为原则，站房地源热泵机组供冷热量设计值取 3405kW，枢纽地源热泵机组供冷热量设计值取 4219kW。

根据 3.1 节全年负荷计算结果可以得出，站房全年累计总冷热负荷为 38553783kW，枢纽全年累计总冷热负荷为 46774411kW。同时，按照负荷小于地源热泵机组设计容量时取实际值，负荷大于地源热泵机组设计容量时取机组设计值，可以计算得到站房部分地源热泵机组全年供冷热量为 12375764kW，枢纽部分地源热泵机组全年供冷热

量为 10056498kW。

为了进一步对系统应用可再生能源情况进行评价, 本文对系统可再生能源应用率开展计算, 可再生能源利用率 R_{ch} 按照下面公式计算:

$$R_{ch} = \frac{\Sigma \text{地源热泵机组全年供冷热量}}{\Sigma \text{空调系统全年总冷热负荷}} \quad (7)$$

带入上述计算数据可得, 站房空调系统 R_{ch} 为 32.1%, 枢纽空调系统 R_{ch} 为 21.5%, 项目可再生能源利用率均大于 20%, 节能减排效益显著。

4 结论

本文依托成都某综合交通枢纽土壤源地源热泵项目, 开展热响应试验分析与评价, 基于测试效果及经济角度提出推荐的换热器形式。再此基础上, 分析全年空调能耗中可再生能源利用率。主要结论如下:

(1) 该工程区地下水类型主要为基岩裂隙承压水, 地下水的渗流作用加强了热量交换速率, 使测试得到的岩土体的综合热换功率值偏大; 项目区域的岩土体 (深度 110m 内) 初始平均温度为 18.3~18.8℃, 由于受地下承压水和气温影响, 初始温度差别较大, 建议取 18.32℃;

(2) 该项目区域的岩土体双 U 平均导热系数平均值为: 2.45~2.78w/(m·K)。从测试效果和经济角度出发, 各试验孔双 U 形式的地埋管换热功率均大于单 U 形式的热换功率, 热换功率提高约 22%。结合四孔联合测试工况, 建议选用双 U25 地埋管, 夏季标准工况释热能力为 42.89W/m, 冬季标准工况取热能力为-42.66W/m。

(3) 全年动态负荷计算分析结果表明, 该项

目站房部分可再生能源应用率可达 32.1%, 枢纽部分可再生能源应用率可达 21.5%, 项目可再生能源利用率较高。

该研究成果可为在轨道交通领域推进浅层地热能利用提供可靠的技术路线及理论依据。

参考文献:

- [1] 徐伟, 刘志坚. 中国地源热泵技术发展及展望[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 26-33.
- [2] 中国地源热泵发展研究报告 (2018) [R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] 杨光明, 韩叙, 王鹏. 某体育场馆地源热泵系统应用与节能分析[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(3): 145-147.
- [4] 王义杰, 韩永亮, 汪启龙, 等. 西安某地源热泵项目设计优化研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(20): 123-126.
- [5] 杨文芳. 地源热泵在新建建筑中应用的经济性研究及政策建议[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [6] 巫朝敏. 成都地区地源热泵的环境和经济效益关联研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] GB 50366-2005, 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] 王静茹. 扬州灌云县浅层地源热泵热响应测试及影响因素分析研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [9] T/CECS 730-2020, 地埋管地源热泵岩土热响应试验技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [10] 冯国会, 赵佳绩, 黄凯良. 某超低能耗建筑地源热泵夏季运行的调试与运行问题分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 50-55.
- [11] GB/T 50378-2019, 绿色建筑评价标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [10] 彦启森, 石文星, 田长青. 空气调节用制冷技术[M]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [11] 李谊, 邱永祥, 王晓斌, 等. 动车组检维护作业职业病危害程度分析研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2015, 5(5): 227-233.
- [12] GB/T 18883-2022, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

(上接第803页)

- [7] YIN H, LI A. Airflow characteristics by air curtain jets in full-scale room[J]. Journal of Central South University, 2012, 19: 675-681
- [8] 张辉. 基于多因素耦合的室内污染物扩散浓度场模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [9] 顾登峰, 张冷, 周春慧. 地下车库污染物浓度的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2007, (1): 93-96.