

贵州省清镇市某学校新校区地源热泵系统工程应用及分析

康豫鲁

贵州有色地质工程勘察公司 贵州贵阳 550001

摘要: 为加强贵州省清镇市地热资源勘查、合理利用和保护,提高地热资源对贵安新区经济社会提供可持续发展的保障能力,结合清镇市职教城地热资源勘查与开发现状,为下一步规划阶段建设代表性地源热泵示范工程、开展热响应试验关键参数、地温自恢复能力、浅层地温能开发利用对环境的影响等专题研究,为区域浅层地热能资源开发利用规划和布局提供依据,同时为政府对能源结构宏观调控、减少二氧化碳排放提供支持。

关键词: 地热资源; 浅层地温能; 土壤源地源热泵; 岩土热响应试验。

Application and analysis of ground source heat pump system Engineering in a new campus of a school in Qingzhen, Guizhou Province

Yulu Kang

Guizhou Nonferrous Geological Engineering Survey Company, Guiyang, Guizhou 550001

Abstract: In order to strengthen the exploration, rational utilization and protection of geothermal resources in Qingzhen, Guizhou Province, and improve the guarantee ability of geothermal resources for sustainable economic and social development of Kneeling 'an New Area, combined with the current situation of geothermal resources exploration and development in Qingzhen Vocational Education Town, It provides a basis for regional shallow geothermal energy resources development and utilization planning and layout, as well as support for the government's macro-control of energy structure and reduction of carbon dioxide emissions by constructing representative ground source heat pump demonstration project in the next planning stage, carrying out research on key parameters of thermal response test, ground temperature self-recovery ability, and environmental impact of shallow geothermal energy development and utilization.

Keywords: Geothermal resources; Shallow geothermal energy; Soil source heat pump; Thermal response test of rock and soil

引言

1. 自然地理条件

拟建项目区位于清镇市北西侧清镇职教城西区內,

属清镇市站街镇辖区(见图1),毗邻规划中的“时光贵州”西区,占地面积约500亩。



图1 贵州省财政学校新校区拟建场地交通位置图

拟建场地属中低山侵蚀、溶蚀、剥蚀沟谷地貌类型，总体呈南东高北西低之势。拟建场地内最高点高程 1347.8m，最低点高程 1233.2m，高差 114.6m。

拟建场地东侧有一小溪由北至南流过，水质清澈，流量约 3.00L/s，长年有水。

2. 工程概况

该项目，云龙大道与腾龙路从该项目场地东、西两侧通过，以后交通十分便利。该项目规划建筑面积约 17 万 m²，框架、框剪结构，总投资约 51237.90 万元。包括教学楼、图书馆、行政楼、宿舍楼、实训楼、食堂、体育馆等。

一、试验目的、依据及试验要点

1. 试验目的

通过现场岩土热相应测试试验，获取地源热泵系统规划场地地层岩石的平均导热系数，为地源热泵系统的准确性、合理性、经济性设计提供完整和准确的参数。

2. 试验依据

- (1)《地源热泵系统工程技术规范》(GB50366-2005)(2009 年版)；
- (2)《可再生能源建筑应用工程评价标准》(GB/T50801-2013)；
- (3)《暖通空调热泵技术》(2008 年版)；
- (4)贵州省财政学校新校区建设项目勘察补充协议(岩土热响应试验)；
- (5)《贵州省财政学校新校区拟建场地浅层地温能热响应试验方案》

3. 试验要点

该项目设计地下换热管双 U 埋管方式，换热管管材采用 HDPE100 管(1.6MPa)，双 U 埋管井深 90-100m。该项目在 3 个试验孔实施过程中，均为双 U 埋管，埋管井深 95m。具体测试要点：

- ①按要求成井，并做好施工纪录；同期完成换热管的打压试验。
- ②在放好换热管的孔中回填填料，并将换热管中充满水。
- ③保证换热管内充满水，封闭管口，让其稳定。
- ④采用无功循环法测试试验段岩石平均温度。
- ⑤某时刻起对换热管环路中的水进行连续加热，并记录加热功率、回路中水的流量、水温及其对应的时间。
- ⑥采集、记录、处理测试数据，并动态显示水温变化、电压、电流等参数，并自动绘制其参数变化曲线。

二、试验方法及现场工作

1. 试验方法、设备及原理

①岩土原始温度，采用无功循环法进行测试，即开启水泵循环直到测试流体的进出水温度趋于恒定，这时可以认为该温度值即为地下换热管埋深范围内的岩土层的原始平均温度。

岩土平均导热系数，采用人工加热循环法进行测试，

即开启水泵及加热器循环，同时保证管内流量基本稳定，直到测试流体的进出水温差趋于恒定，利用测试数据，根据开尔文的线源理论，计算出岩体平均导热系数。

②测试设备包括以下构件：试压、保压后的成井；岩土热物性测试仪采用北京市华清地热开发有限责任公司研发的 GH-12FT05 浅层地热能测试仪及其配套软件；稳定的三相交流电源。

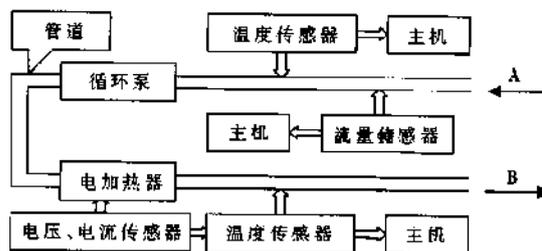


图 1 测试仪结构原理图

图 2 测试仪结构原理图

如图 2 所示，由于泵的作用，流体由 A 口进入，传感器采集信号。流体通过泵后，由电加热器加热，加热的流体温度信号由传感器采集，然后流体从 B 口流出，输入到埋置于深层岩土中的 PE 管内，导管内加热的流体与深层岩上进行热交换后，又从 A 口返回到仪器内，形成封闭的循环。将在一定时间内连续采集到的功率、温度等参数作为测量数据，再由线热源理论公式求出岩体的平均导热系数，继而对埋管进行换热计算，达到检测目的。

数据输出通过专用程序软件来实现，将采集到的数据以特殊的格式存储在控制柜中的电脑里，也可转移到其他计算机中；根据所收集数据通过专业数据分析软件进行数据分析。

2. 试验工作布置

本次试验按规范要求共布置 3 个试验孔，分别布置在拟建场地初步规划的空地上，具体如下——SK1 布置在办公、住宿区空地，SK2 布置在教学区空地，SK3 布置在体育场。各试验孔位置示意参见图 3、图 4、图 5，各孔坐标参见表 1。



图 3 SK1 试验孔布置示意图

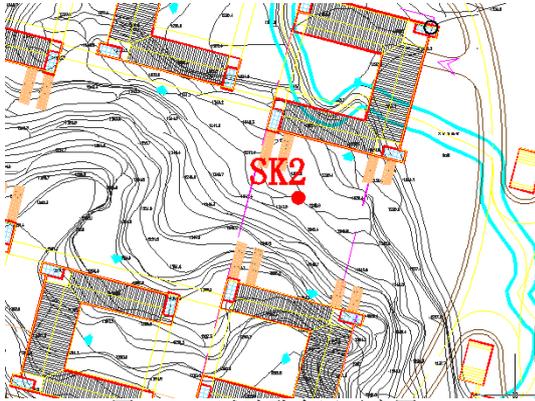


图4 SK2 试验孔布置示意图

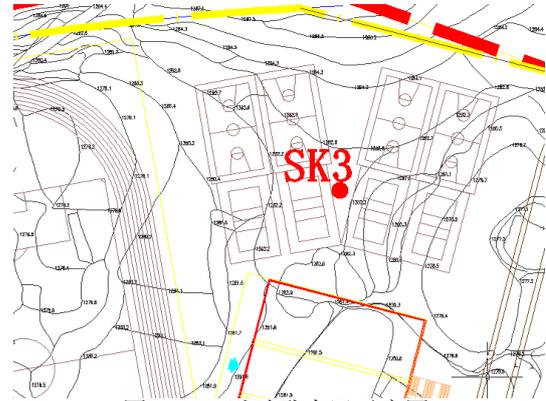


图5 SK3 试验孔布置示意图

试验孔孔口坐标标简表 表 1

孔号	孔口坐标	备注
SK1	东经 106° 26 15.17 , 北纬 26° 35 40.64	
SK2	东经 106° 26 12.78 , 北纬 26° 35 45.38	
SK3	东经 106° 26 12.69 , 北纬 26° 35 45.34	

3. 现场工作

该项目岩土热响应试验工作于 2015 年 1 月开始，工作中。因该项目属征地尚未完成，现场施工条件较差，不具备“三通一平”的施工条件，施工设备不能直接就位，

需修施工便道，进行二次搬运；又因气候寒冷、春节放假、电压不稳定等原因，致使至今才完成本次试验工作。完成的主要工作量如下表：

完成工作量一览表 表 2

序号	类型	单位	工作量	备注
1	孔位测放	点	3	
2	试验孔施工	m	300	岩性为碎屑岩、硅质岩、白云岩
3	换热管制安	m	1200	双 U 模式, 单孔换热管总耗 400m
4	换热孔填埋	m ³	7.65	填料为水泥砂浆
5	试验孔测试	点	3	单孔实际合格的测试时间大于 72 小时
6	设备二次搬运修建施工便道	Km	0.3	路宽 3m
7	小溪导流管铺设	m	8	273 无缝钢管
8	小溪填沟筑路	m ³	160	

三、试验场地基本环境条件

1. 气象与水文

拟建场地属亚热带温和湿润气候区，冬暖夏热，冬春半干燥夏季湿润型，四季分明。季节性变化较大，最高气温 34.5℃，以 5 ~ 9 月最热，最低气温 -8.6℃，以 11 ~ 3 月最冷，平均气温 16.6℃，年最大降雨量

1601.8mm，其中以 6-8 月降雨量最大，占全年降雨量的绝大部分，最大年降雨量 717.30mm，年平均降雨量为 1192.50mm，最大日降雨量为 146.6mm，相对湿度 83%，最高 100%，最低 38%。区内多东北风和东南风，历年最大风速 19m/s，年最小风速 2.3m/s，年平均风速

2.7m/s。

拟建场地东侧有一小溪由北至南流过，水质清澈，流量约 3.00L/s，长年有水。

2. 岩土工程条件

(1) 构造

拟建场地区域上位于扬子准地台—黔北台隆—遵义断拱—贵阳复杂构造变形区。据前期地质灾害评估资料，拟建场地内有 3 条正断层通过，断层两盘地层为三叠系下统安顺组 (T_{1a}) 白云岩和二叠系上统龙潭组 (P_{3l}) 含燧石泥晶灰岩、硅质岩、砂岩、质粘土岩及寒武系下统清虚洞组 (Є_{1q}) 白云质灰岩。

(2) 地层

拟建场地出露地层主要有三叠系下统安顺组 (T_{1a}) 白云岩和二叠系上统龙潭组 (P_{3l}) 含燧石泥晶灰岩、硅质岩、砂岩、质粘土岩及寒武系下统清虚洞组 (Є_{1q}) 白云质灰岩。现由新至老简述如下：

(1) 第四系 (Q)：主要为残坡积粘土，场地大部有分布，一般厚度小于 10m。

(2) 三叠系下统安顺组 第一段 (T_{1a})：浅灰白色中—厚层中晶白云岩，时见残余粒屑。

(3) 二叠系上统龙潭组 (P_{3l})：中厚层含燧石泥晶灰岩、生物碎屑泥灰岩、薄层硅质岩，薄—中厚层粉砂岩、细砂岩，含灰质粘土岩，煤层组成旋回式沉积，一般见 3—5 个韵律层段，局部可采。

(4) 寒武系下统清虚洞组 (Є_{1q}) 浅灰色中厚层粉晶白云质灰岩，局部见鲕粒灰岩。

3. 地下水

拟建场地地下水主为构造裂隙水，水位较高，水量较丰富，主要靠大气降水补给，拟建场地东侧小溪是相对排泄基准面。SK3 孔钻进施工结束时曾出现地下水自流，水量约 5.00L/s。



SK3 孔钻进施工结束后地下水自流

四、现场试验

1. 试验环境

空调设计室外计算参数 (清镇)

大气压力：冬季 877.4 hPa；夏季 869.5 hPa

室外计算温度：冬季 -5.7℃；夏季 32℃

夏季室外计算干球温度：25℃

冬季室外计算干球温度：-4℃

夏季空调湿球温度：21.9℃

夏季室外计算相对湿度：80% (夏季通风 67%)

冬季室外计算相对湿度：82%

空调设计室内设计参数

夏季：26 ± 2℃，相对湿度：60%

冬季：20 ± 2℃，相对湿度：30%

2. 试验流程

试验孔测放 试验孔钻进 换热管制作、打压试验 换热管安装 二次打压试验 试验孔填埋、待凝设备安装、调试 热响应试验。

3. 现场测试

换热管制安完成、设备调试完成后，即开始进入数据采集阶段。首先采用无功循环法测试岩土平均温度，有效测试时间不小于 12 小时；岩土平均温度测试完成后，启动加热泵，开始加热循环，采集热响应参数计算所需参数，有效测试时间不小于 48 小时。

五、数据分析

1. 测试条件

测试日期：2015-3-12 ~ 2015-3-25；

测试设备：GH-12FT05 浅层地热能测试仪及其配套软件；

换热器型式：双 U 埋管，DN32；

埋管长度：95m；

钻井尺寸：Φ180mm；

灌浆填料：水泥砂浆；

循环流体：水。

2. 岩土原始温度

在测试初始阶段，首先对地下岩石的原始温度进行测试，为以后进行地下换热管的设计提供参数。开启水泵循环直到测试流体的进出水温度趋于恒定，这时可以认为该温度值即为地下换热管埋深范围内的岩土层的原始平均温度。

实验得出地下换热管埋深范围内的单孔岩土层的原始平均温度为：SK1 为 16.44℃，SK2 为 16.62℃，SK3 为 16.39℃；可计算得出场地地下换热管埋深范围内的岩土层的原始平均温度为 16.48℃。

3. 平均导热系数计算

埋管土壤换热测试实验的理论基础是开尔文的线源理论，以下公式 (1) 描述了线源理论，我公司的实验软件就是以此理论为基础。

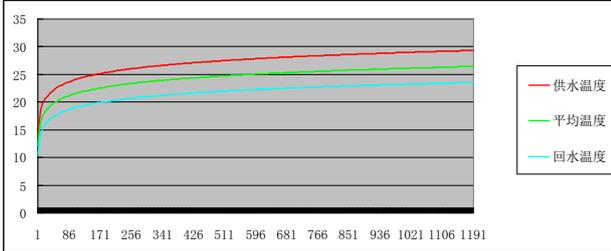
$$p = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \quad \Delta T_{i(a,t)} = \frac{q}{4\pi\lambda H} \int_p^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad \text{----- (1)}$$

α —— 导温系数 λ —— 导热系数

H —— 管子长度 β —— 积分常量

t—— 实验开始时间 q—— 热量
 ΔT —— 温差 r_b —— 钻孔半径
 c_v —— 定容比热

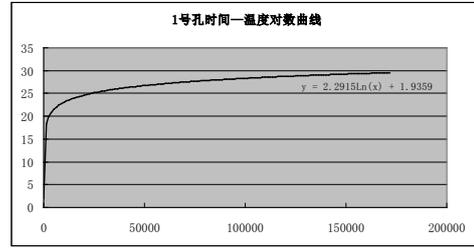
开启电加热后，供回水温差变大。再关闭电加热，供水温度恢复到初始状态。最后在开启电加热，供回水温度再次上升。根据水温和时间的变化进行埋管土壤导热计算。整个测试过程示意图如下：



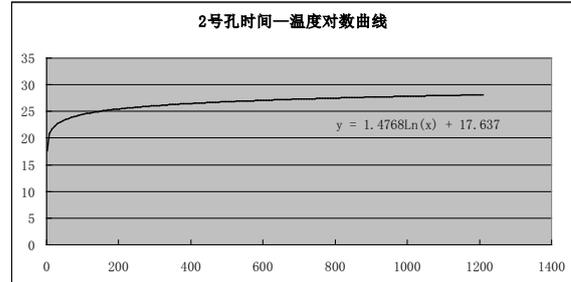
岩土综合导热系数计算：

$$FTC = \frac{Q}{4 \times \pi \times m} \quad (2)$$

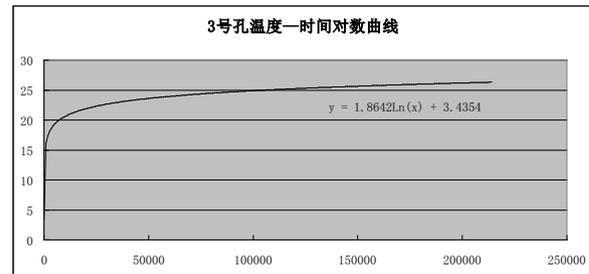
式中 Q --- 加热功率 / 钻孔深度，m --- 温度—时间对数斜率



SK1 孔时间 - 温度对数曲线



SK2 孔时间 - 温度对数曲线



SK3 孔时间 - 温度对数曲线

单井计算结果见下表：

单井综合导热系数成果表 表 3

孔号	加热量 (W)	深度 (m)	Q (W/m)	温度 - 时间对数斜率, m	单井综合导热系数, FTC
SK1	9233	95	97.19	2.2915	3.375
SK2	6295	95	66.26	1.489	3.571
SK3	8320	98	84.89	1.8642	3.624

综合计算可得出拟建场地岩土层综合导热系数：

$$FTC = 3.531 \text{ w} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

4. 埋管换热器的热阻计算

管壁热阻可按公式计算：

$$R_{ps} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln\left(\frac{d_o}{d_i - (d_o - d_i)}\right) \quad (3)$$

式中

- R_{ps} --- 埋管的管壁热阻 (m · K/W)
- λ_p --- 埋管导热系数 [W / (m · K)]
- d_o --- 埋管的外径 (m)
- d_i --- 埋管的当量直径 (m)

土壤 / 场地热阻

土壤 / 场地热阻的计算是个非常复杂的过程，根据 IGSHPA 推荐的公式及数据，以线源理论为基础，计算

得出结果。

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{at}}\right) \quad (4)$$

$$I(u) = \frac{1}{2} \int_u^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds \quad (5)$$

5. 单孔换热量计算

(1) 测试数据在软件模拟分析的过程中，需要根据当地气候条件输入相关计算参数。软件界面中有对应的制冷模式、制热模式设计热泵进水温度值：制冷模式、制热模式进水温度分别按机组运行名义工况设定为 29.0℃、10.0℃。在冬夏实际工况下作修正即可。

(2) 土壤平均导热系数 FTC：3.531 W / (m · °C)
 换热孔的换热量是与换热管内的流体特性、换热管

的材料特性、周围土壤的土质、土壤的赋水情况及如果含水水是否流动、回填料的特性及土壤的原始温度和换热管内流体的温度等诸多因数有关，这些因素都直接影响着整个土壤换热器的换热能力，由于地下的土壤结构及分布比较复杂，只有通过测试试验孔并绝对能力——综合传热系数来衡量整个换热孔的换热性能。通过软件分析数据，计算结果。

根据工程资料以及已知参数，通过公式（6）、（7）详细计算，分析结果见表5。

对于夏季工况：

竖直埋管换热器钻孔长度计算负荷公式：

$$L_c = \frac{Q_{冷} \frac{EER+1}{EER} (R_{pe} + R_s \times F_c)}{t_{max} - t_H} \quad (6)$$

式中：

$Q_{冷}$ —— 夏季工况冷负荷；

R_{pe} —— U形管的管壁热阻；

R_s —— 土壤/场地热阻；

F_c —— 制冷运行比例；

T_{max} —— 设计最高进水温度；

T_H —— 全年土壤最高温度；

单位井深换热量 K_c , W/m；

按平均每 m 井深换热量计算单孔换热量 Q_c , W, 由 K_c 推导得出。

对于冬季工况：

竖直埋管换热器钻孔长度计算负荷公式：

$$L_h = \frac{Q_{热} \frac{COP-1}{COP} (R_{pe} + R_s \times F_h)}{t_L - t_{min}} \quad (7)$$

$Q_{热}$ —— 冬季工况热负荷；

R_{pe} —— U形管的管壁热阻；

R_s —— 土壤/场地热阻；

F_h —— 制热运行比例；

T_{min} —— 设计最低进水温度；

T_L —— 全年土壤最低温度；

单位井深换热量 K_c , W/m；

按平均每 m 井深换热量计算单孔换热量 Q_c , W, 由 K_c 推导得出。

(3) 测试结果

综合导热系数分析：根据实验现场采集的数据，分析得出 95m 深的双 U 型换热器，其土壤的平均导热系数为 3.531 W/(m·℃)，意味着有较强的地下换热能力，适合做地源热泵系统。

双 U 埋管综合分析、测试参数汇总 表 4

埋管深度(m)	土壤原始温度()	单孔流量(m3/h)	土壤导热系数(W/m·)	埋地管的管道热阻(m·K/W)
95	16.48	1.40	3.531	0.078

双 U 埋管综合分析、测试参数汇总 表 5

制冷模式	埋管深度(m)	夏季换热指标(W/m 井深)	夏季单捆盘管散热量(W)
	95	73.95	7020
制热模式	埋管深度(m)	冬季换热指标(W/m 井深)	冬季单捆盘管吸热量(W)
	95	54.64	5190

六、结束语

1、贵州省财政学校新校区土壤的平均导热系数为 3.531 W/(m·℃)，意味着场地岩土体有较强的地下换热能力，适合做地源热泵系统。

2、贵州省财政学校新校区出露基岩为软岩——较硬岩，岩体质量等级为Ⅳ—Ⅴ类，采用气动潜孔锤工艺及牙轮全消磨钻进可确保成井的时间和质量有保障。

3、贵州省财政学校新校区拟建场地地下水较丰富，能有效地保持地下的热均衡。

4、在设计布置钻孔数量时应根据布孔形状取上述试验结果后加修正系数和安全系数。要充分计算冬夏累积冷热负荷值对埋管系统的影响，要确保埋管系统冷热基本均衡。需要确保不同管径的垂直埋管内介质流速必须满足紊流要求。必须针对设计的埋管运行工况进行地源热泵机组选择，因为不同的埋管设计工况下，热泵机组的蒸发器冷凝器需要机组厂家进行相对应的设计选型。确保机组能够在设计的工况下运行室外埋管系统要注意考虑埋管系统的特殊性，确保系统安全、

经济、合理、可靠、可控运行。地埋管钻孔间距不得小于4米。

参考文献:

[1] 陈岩岩. 地下管廊对水源热泵项目水温和水位的数值模拟试验 [J]. 建筑与预算 .2019,(10).DOI:10.13993/j.cnki.jzyys.2019.10.014.

[2] 相虎昌. 水源热泵系统在供热系统中设计案例的应用 [J]. 节能 .2021,(5).DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2021.05.009.

[3] GB. 地源热泵系统工程技术规范 :GB 50366-2005[S].2005.