

埋管地源热泵技术在贵州岩溶地区的应用研究

何文君¹, 向贤礼², 李勇刚¹, 李朝佳¹

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵州理工学院, 贵州 贵阳 550004)

摘要:埋管地源热泵技术是采集地表以下 200 m 深度内的浅层地热能进行供热制冷的新型能源利用技术, 而该技术在贵州碳酸盐岩分布区的应用和推广之所以受到制约, 其主要原因是岩溶地层中建造垂直换热孔的难度大、成本较高。通过贵州省有色科技大楼附楼采用垂直埋管式与基础桩螺旋盘管式有效组合的换热系统, 在岩溶一般至中等发育的碳酸盐岩地层中开发利用浅层地热能的成功经验的介绍, 为埋管地源热泵技术在贵州岩溶地区的应用和推广提供参考。

关键词:浅层地热能; 岩溶地区; 埋管换热系统; 基础桩螺旋盘管; 双 U 垂直埋管

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)08-0062-04

Application Research on Buried Ground-source Heat Pump Technology in Karst Area of Guizhou/HE Wen-jun¹, XIANG Xian-li², LI Yong-gang¹, LI Chao-jia¹ (1. Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang Guizhou 550005, China; 2. Guizhou Institute of Technology, Guiyang Guizhou 550004, China)

Abstract: Buried heat pump technology is a new energy utilization technology for heating and cooling with shallow geothermal energy collected below the surface within 200m in depth, but which is restricted in the application in carbonate rock distribution area of Guizhou mainly because of the difficulties in vertical heat exchange hole building in Karst formaton and the high cost. The paper introduces the successful experience of utilization of shallow geothermal energy by a combined heat exchange system of vertical buried type and foundation pile spiral coil type in carbonate formation with Karst general to medium development, which can be reference for the application and promotion of buried heat pump technology in Karst areas of Guizhou.

Key words: shallow geothermal energy; Karst area; buried heat exchange system; foundation pile spiral coil; vertical-buried double-U pipe

0 引言

近十几年,埋管式地源热泵技术主要在我国北方各地有许多工程应用实例,技术比较成熟。在地处高原以溶蚀作用为地貌成因的贵州地区,碳酸盐岩大面积出露,岩溶发育,地下水分布极不均匀,第四系厚度薄,不适宜水平埋管换热系统和地下水换热系统开发利用浅层地热能,但浅层地热能资源潜力大,具备地源热泵开发利用的各项条件,适宜竖直埋管地源热泵系统的建造^[1],可进行大力推广。因此,选择适宜建造垂直换热孔的施工工艺,有效降低埋管换热孔的钻掘费用,推广地源热泵技术在岩溶地区的应用,有效获取浅层地热资源,是一个具有重要现实意义的研究课题。本文通过贵州省有色科技大楼附楼工程场地建造埋管地源热泵系统的开发利用实例,介绍了采用拟建物基础桩螺旋盘管与垂直埋管有效组合式的埋管地源换热系统进行制冷/供热的成功经验,为埋管地源热泵技术

在贵州岩溶地区推广应用提供参考。

1 场地浅层地热地质条件

贵州省有色科技大楼包括主楼和附楼,主楼层高为 -2 + 19F,拟用端承桩基础,设计桩长 0 ~ 12 m;附楼 5 层,拟用独立基础,附楼采用埋管地源换热系统进行供热和制冷。拟建工程场地位于贵阳向斜东翼,近向斜昂起端,断裂构造一般发育。场地原始标高 1082 ~ 1086.5 m,场地岩层单斜产出,倾向 241°、倾角 68°。场地第四系厚度分布不均匀,为 0 ~ 8.5 m,下伏地层为三叠系下统安顺组(T_{1a})白云岩,灰~浅灰色、薄~中厚层状。钻探揭露:浅部白云岩体节理、风化裂隙、构造裂隙较为发育,一般以溶孔、溶蚀裂隙发育为主;标高 1050 ~ 1045 m 以深白云岩体的岩溶发育程度为中等发育,见洞隙率达 23.8%,岩溶发育形态主要以溶洞为主,揭露最大溶洞高为 1.00 m,一般溶洞高 0.50 ~ 0.80 m,局

收稿日期:2014-03-03; 修回日期:2014-06-06

作者简介:何文君(1967-),女(汉族),湖北人,贵州省有色金属和核工业地质勘查局高级工程师,水文地质工程地质专业,工程硕士,从事水文地质与工程地质工作,贵州省贵阳市宝山南路 564 号,1181950095@qq.com。

部溶洞连通性较好,多数溶洞呈半充填状态,充填物为软塑~流塑状粘土。

场地地下水潜水位标高为 1001.00 m,以浅主要为赋存于包气带岩石空隙、岩溶裂隙中的重力水;以深主要为赋存于饱水带岩石中的岩溶裂隙水,其空间分布、赋存状态取决于岩溶、裂隙发育程度等,具各向异性。

钻探揭露,垂直埋管换热器系统所采集是白云岩层中浅层地热能,岩溶一般至中等发育,装螺旋盘管换热器系统所采集是红粘土及白云岩强风化层中浅层地热能。经场地地温测量,0~35 m 为变温层,35 m 以深为恒温层。恒温层的温度为 16.7~17.6℃;变温层的温度受大气温度影响较大,夏季,低于大气温度 5~10℃,冬季,高于大气温度约 3~8℃。

2 场地热响应试验成果

场地岩土体的综合热导系数是埋管地源热泵系统设计的重要参数,采用现场测试获得的热物性参数更能真实、可靠地反映工况条件。

考虑到本建筑工程后期部署双 U 垂直埋管的场地面积不足问题,试验增做桩埋螺旋盘管换热器的红粘土热物性测试。螺旋盘管的桩孔径为 1200 mm,孔深 7.8 m,盘管间距 10~12 cm,桩周土为硬塑~可塑状红粘土,嵌岩深度为 0.8 m;垂直埋管孔采用并联式垂直双 U 埋管换热器类型,孔深 100 m,孔径 150 mm。

通过现场采集数据,用线源理论^[2],结合本地

区气候条件及测试工况(夏季),场地岩土体综合热导系数测试成果^[3]见表 1。

表 1 场地岩土体热物性测试参数成果表

建造埋管类型	测试目的层	岩体原始温度 /℃	综合热导系数 / $[W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}]$	埋管的管道热阻 / $[m \cdot (k \cdot W)^{-1}]$
桩螺旋盘管	红粘土	20.6	1.49	0.091
双 U 垂直埋管	白云岩	22.1	3.12	0.078

通过表 1 分析,现场热响应试验获得的白云岩、红粘土综合热导系数值分别为 3.12、1.49 W/(m·℃),两者均高于规范^[3]中泥岩、页岩的热导系数。说明碳酸盐岩分布区,虽岩溶裂隙发育,但岩土体仍然具有较强的地下换热能力,因此本场地适宜建造埋管地源热泵系统。

3 换热器系统设计、施工

为充分利用有限场地,确保最大采集场地红粘土、白云岩层中浅层地热能,提高埋管热泵系统总换热量,同时,节省建造垂直换热孔的钻掘成本和占地面积,本场地采用基础桩(能量桩)与垂直换热孔有效组合(见图 1)。依据规划,垂直埋管孔布置于科技大楼主楼北部出入口绿化带,面积为 30 m×30 m,呈不规则状,垂直埋管孔平面间距 4 m,共部署实施 22 孔,采用 PE 材质的双 U 垂直埋管换热器类型(图 2),单换热孔深 80~85 m,总孔深为 1750.5 m,完成下置双 U 总长 6694 m,换热量计算总长度 1668.5 m。

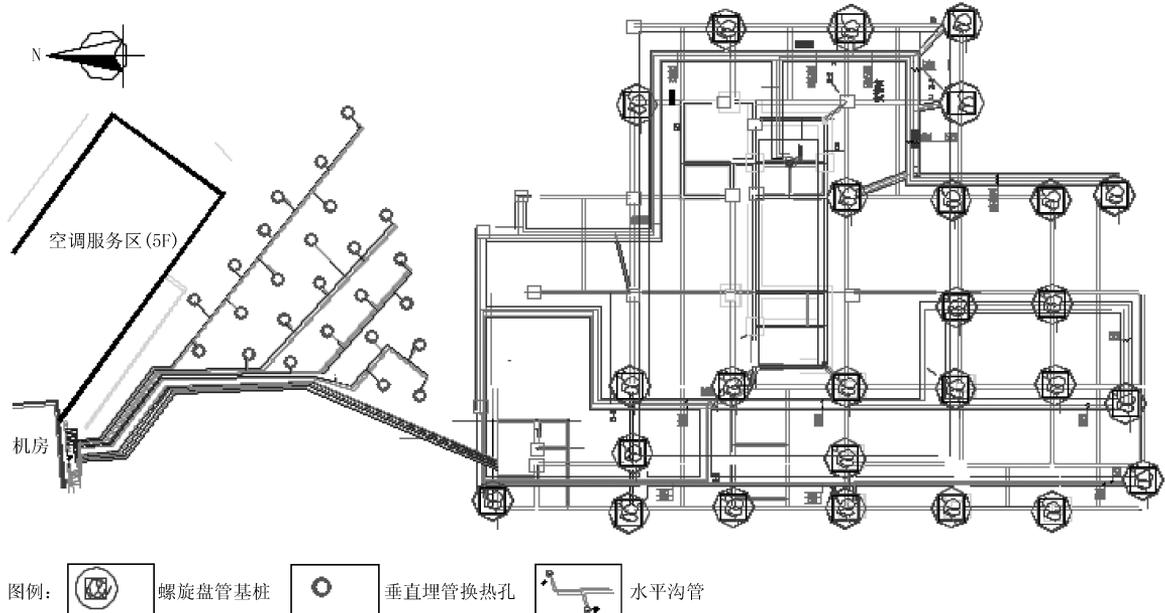


图 1 垂直埋管与桩螺旋盘管有效组合平面布置图

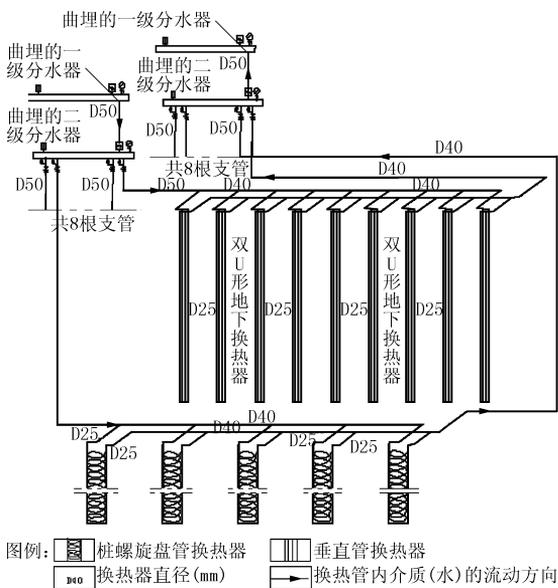


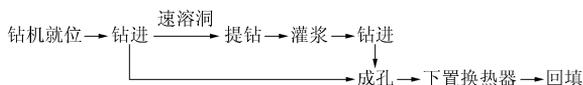
图2 垂直埋管与桩盘螺旋管有效组合式换热器立面图

桩埋螺旋盘管是将换热器,在建筑物混凝土桩基施工时,以螺旋式盘绕安装于桩基钢筋笼外侧,并随同钢筋笼一起下入桩孔中,利用灌注混凝土成桩进行埋设,不改变桩基施工顺序,如图3所示。盘管间距为10~12 cm,本工程共利用22根桩安装盘管,埋设螺旋盘管总长5200 m。



图3 钢筋笼下置桩孔及灌注成桩图

换热孔施工采用MJ400型车装式水井钻机2台套施工,配备HP1070空压机,用气动潜孔冲击器钻进,依据场地浅层地热勘查成果,场地岩溶一般至中等发育特征,在冲击器上部安装了 $\varnothing 146\text{ mm} \times 3\text{ m}$ 导正器,预防冲击器钻入溶洞后发生偏斜。施工顺序:



施工过程中,对遇到大于0.5 m的溶洞采取提钻灌注充填,待浆体凝固后再进行钻进,灌浆采用砂浆泵下导管灌注,骨料选用与场地地层岩性一致的建筑用白云岩砂,配合比水泥:水:砂=1:2:4,且在浆液中加入一定量的早强剂,经凝固后继续钻进。

全部换热孔施工、换热器安装仅用10天完成,节约了施工时间,有效地降低了换热孔施工成本。

4 场地浅层地热能评价

4.1 场地浅层地热能的静储量计算

本场地浅层地热能的静储量计算采用体积法^[4],依据场地水文地质条件,埋管控制深度位于潜水位以浅,即评价场地静储能的地质体位于包气带中,因此,计算场地浅层地热能的静储量参照下式计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W + Q_A$$

$$Q_S = \rho C_S (1 - \varphi) M d_1$$

$$Q_W = \rho_s C_w \omega M d_1$$

$$Q_A = \rho_A C_A (\varphi - \omega) M d_1$$

计算式中,白云岩体密度(ρ_s)、岩体的孔隙率、含水量、岩体骨架比热容(C_S)、空气密度、水密度、空气比热容等参数参照规范^[4]及依据现场试验取值,计算面积(M)分M1区、M2区,M1为垂直埋管布置区,计算厚度为换热孔控制深度,计算面积取埋管边界外延4 m圈定的平面面积;M2为桩埋螺旋盘管布置区,计算厚度取值最大埋桩桩长,计算面积取桩埋管边界外延4 m圈定的平面面积。则场地浅层地热能的静储量计算结果见表2。

表2 场地浅层地热能的静储量计算结果表

区块	静储量/kJ	合计
M1	3.72×10^{10}	5.67×10^{10}
M2	1.95×10^{10}	

4.2 热泵系统的换热量计算

依据现场热响应试验成果,由22孔双U垂直埋管和22根基桩螺旋盘管共同建造的埋管换热系统参数计算成果如表3、表4所示。

表3 桩基螺旋盘管参数计算成果表

模式	埋管长度/m	换热指标/($\text{W} \cdot \text{m}_{\text{管长}}^{-1}$)	单捆盘管散热量/W
制冷	5200	18.2	94640
制热	5200	12.2	63440

表4 双U垂直埋管参数计算成果表

模式	埋管长度/m	换热指标/($\text{W} \cdot \text{m}_{\text{井深}}^{-1}$)	单捆盘管散热量/W
制冷	1668.5	70.8	118130
制热	1668.5	50.2	83759

由表3、表4,地源热泵系统的室外换热器采用基础桩螺旋盘管换热器和双U埋管换热器联合进行取热和放热,不考虑水平埋管换热器产生的热量,

整个系统理论总制冷量约为 212.7 kW, 总制热量约为 147.2 kW。

4.3 埋管地源热泵系统建造

依据建筑物使用功能, 结合贵阳地区冬无严寒、夏无酷暑的气候特点, 夏季制冷负荷估算指标取值 110 W/m^2 , 冬季制热负荷估算指标取值 100 W/m^2 , 则本场地所建造的浅层地热能热泵空调系统负荷面积为 $1470 \sim 2100 \text{ m}^2$, 建筑面积按空调负荷面积的 1.25 系数计, 则能满足建筑面积为 $1837 \sim 2625 \text{ m}^2$ 的空调负荷。即满足有色科技大楼附楼(5F)空调负荷要求。

主机 1 台(两个模块机), 总制热/制冷量为 147 kW/173 kW, 二级分水器共 16 根支管(8 根回水管, 8 根出水管), 其中垂直换热器和螺旋盘换热器各 8 根见图 2。

5 系统运行情况评价

地下水的渗流对岩石热交换有显著影响^[5], 不仅体现在增加换热器的热交换能力上, 也体现在有效降低冷热负荷不平衡上^[6]。

本场地稳定地下水位埋藏较深, 垂直埋管和桩螺旋盘管分布空间基本上位于包气带中, 因此场地热均衡评价未考虑地下水渗流影响因素。

冬季工况下, 热泵系统运行观测成果可知: 地源侧进出口水温差 $3.4 \sim 3.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 场地岩土恒温层温度约为 $15.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 依据回水温度基本稳定时的出入口温差计算^[4], 冬季总吸热量 Q 为 145 kW。按冬季采集浅层地热能吸热量天数 90 天计, 机组 24 h 运行, 累计可利用的热能量为 $1.14 \times 10^9 \text{ kJ}$ 。

夏季工况下, 热泵系统运行观测成果可知: 进出口水温差 $3.7 \sim 4.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 场地岩土恒温层温度为 $16.2 \sim 17.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 依据回水温度基本稳定时的出入口温差计算^[3], 夏季总散热量 Q 为 143 kW。按夏季排放地质体中热量天数 91 天计, 累计排放热能量为 $1.12 \times 10^9 \text{ kJ}$ 。

计算结果表明冬季热泵系统运行时, 换热器的吸热量远小于场地浅层地热能的静储量; 夏季热泵系统运行时, 换热器向岩土体总排放热量值小于场地岩体吸热负荷值(依据现场热响应试验成果, 夏季工况条件, 场地岩土体最大吸热量为 212 kW)。

由此可见, 本场地建造埋管式热泵系统的设计是在现场热响应试验成果的基础上进行的, 参数

取用真实、可靠、有效, 地下埋管换热器的换热/制冷效果比较稳定, 夏、冬的冷热均衡。

6 结论与建议

(1) 本工程场地建造的热泵系统运行结果表明, 在岩溶一般至中等发育的白云岩地层中, 双 U 管的时均单位埋深换热量达到 $50 \sim 70 \text{ W/m}$, 白云岩具有较强的地下换热能力, 采用埋管地源热泵系统技术开采浅层地热能进行供热/制冷是适宜的。

(2) 通过现场热响应试验发现, 埋管换热器的取、放热性能不仅与井深、水流量、场地地层岩性等有关, 还与当地的气候条件、换热管类型有关。贵阳地区白云岩地层中换热器的取、放热性能高于泥、页岩分布区。

(3) 在桩长适宜的情况下, 可有效利用建筑物桩, 采用钢筋笼外(内)螺旋盘管类型的换热器采集浅层地热能无疑是节约投资、节省用地, 该埋管换热器类型值得研究。

(4) 针对贵州岩溶地区, 换热孔施工采用气动潜孔锤钻进, 配置适宜导正器, 能有效防止冲击器钻入溶洞后发生偏斜, 提高钻进速度; 岩溶发育地段, 灌浆料的强度等级达到 C20 为宜, 浆液中加入一定量早强剂, 以限制砂浆远距离流失, 以达到控制砂浆灌注量, 有效降低灌浆成本。

(5) 浅层地热能的采集能力与场地岩土体的热导系数关系密切, 而岩土体的热导系数与岩土性质、地下水的赋存情况、岩溶发育程度等密切相关。要准确获取岩土体的热物性参数, 建议进行岩土地质单元划分研究。

参考文献:

- [1] 段启杉, 孟凡涛, 宋小庆, 等. 贵阳市浅层地温能开发利用现状及发展前景[J]. 地下水, 2013, 35(1): 44, 58.
- [2] 刁乃仁, 方肇洪. 埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 贵州有色地质工程勘察公司. 贵州省有色科技大楼附楼场地岩土综合热物性测试成果报告[R]. 贵州贵阳, 2012.
- [4] DZ/T 0225-2009, 浅层地热能勘查评价规范[S].
- [5] 王庆鹏. 地下水渗流对地源热泵影响的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- [6] 马福一, 刘亚凤. 埋管地源热泵系统的热平衡问题分析[A]. 中国制冷学会. 中国制冷学会 2009 年学术年会论文集[C]. 2009.