

地源热泵系统竖直地埋管设计中的几个原则

浙江大学建筑设计研究院有限公司 刁岳峰[☆]

浙江万合能源环境科技有限公司 周家志

摘要 重点介绍了竖直地埋管地源热泵空调系统各种埋管类型和技术特点,从材料费、综合钻井费、井内回填费 3 个方面对比了不同深度埋管的造价,总结出影响竖直地埋管类型选用的关键因素,进而提出单体建筑地源热泵系统竖直地埋管的设置原则。

关键词 地源热泵 地埋管 类型 影响因素 设置原则

Several principles of the vertical buried pipe in ground-source heat pump system design

By Diao Yuefeng[★] and Zhou Jiazhi

Abstract Presents the technical characteristics of different types of buried pipe in the system, compares the cost for the different buried depth from material fee, comprehensive drilling fee and borehole backfilling fee, and summaries the key factors concerning the selection of different vertical buried pipes. Proposes the setting principle of the vertical buried pipe of ground-source heat pump for individual buildings.

Keywords ground-source heat pump, buried pipe, type, influencing factor, setting principle

★ The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou, China

①

0 引言

地源热泵技术是一种利用地表浅层地热资源(也称地热能,包括地下水、土壤和地表水等)的空调技术。由于地下一定深度的土壤和水温度相对稳定,因此地源热泵与空气源热泵相比,可获得较高的性能参数和可靠的运行状态。在地源热泵系统中,常见的方式有水平埋设和竖直埋设。由于竖直地埋管换热器占地面积小、换热能力强,在国内外被更多关注,也是本文讨论的重点。地埋管换热器的换热能力除受地理条件(包括气候、季节、土壤的性质、地质的结构等)影响较大外,同时与地埋管类型、埋管形式有关;在运用该项技术时必须因地制宜仔细比对,精心设计。本文将各类竖直地埋管的特点、需要的技术条件和经济条件罗列出来,并进行比较,最终提出选择地源热泵地埋管系统的埋管类型、埋管形式的原则。

1 竖直地埋管的类型和技术特性

竖直地埋管的主要形式有:单 U 形管、双 U 形管、小直径螺旋盘管、大直径螺旋盘管、立式柱状

管、蜘蛛状管、套管式管和单管型换热器等。目前国内使用最多的是单 U 形、双 U 形和套管式埋管方式,如图 1 所示。

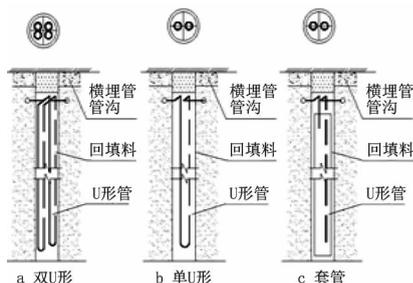


图 1 竖直地埋管换热器剖面图

U 形埋管方式是在地层中钻直径为 0.1~0.15 m 的钻孔,在钻孔中设置一组(2 根)或两组

①[☆] 刁岳峰,男,1966 年 10 月生,硕士,高级工程师
310027 杭州市西湖区天目山路 148 号浙江大学建筑设计研究院
(0571) 85891356
E-mail:2373210382@qq.com
收稿日期:2013-06-13

(4根)U形管并用灌浆材料填实。工程应用中多采用双U形管埋管方式,即在同一竖井中埋入两组U形管,通常钻孔越深,单位面积埋管换热器的换热量越大,但施工成本也越高。该方式具有施工简单、换热性能较好、承压高、管路接头少、不易泄漏等优点,目前在国内外广泛应用。

套管式换热器的外管直径一般为100~200 mm,内管为 $\varnothing 15\sim\varnothing 25$ mm。其优点是增大了管外壁与岩土换热面积,进而提高了单位井深换热量,根据试验结果,其换热效率较U形管提高16.7%。其缺点是套管直径及钻孔直径较大,下管比较困难,初投资比U形管高。在套管端部与内管进、出水连接处不好处理,易泄漏,适用于深度 ≤ 30 m的竖井管。应用范围有限。

单管型换热器在国外常称为“热井”,这种埋管方式与套管式有点类似,不同之处在于其仅在地下水位以上用钢套作为护套,地下水位以下为自然孔洞,循环水不仅直接与岩土换热,还与地下水进行热量交换,换热效率高。单管型埋管方式的优点是可以降低安装费和运行费,缺点是受水文地质条件限制,应用范围有限。

杨敏等人在广州大学城内的研究结果显示,日均单位埋深平均换热量套管式埋管为19.8 W/m,双U形埋管为34.3 W/m,单U形埋管为32.7 W/m。双U形管日均单位埋深平均换热量为单U形管的1.05倍,是套管式埋管的1.73倍^[1]。胡映宁等人在距广西邕江500 m左右区域内的研究成果显示,单U形、双U形和套管式地源热泵埋管换热器日均单位埋深换热量分别约为31,40,62 W/m。双U形管日均单位埋深换热量为单U形管的1.29倍,是套管式埋管的0.65倍^[2]。虽然这两组数字相差悬殊,无法横向比较,但单U形埋管与双U形埋管的性能参数的相对关系还是可以比较的。至于套管式埋管,可以得出易受材料和环境因素影响难于广泛使用的结论。

综上所述,从换热效果和使用可靠性来看,可以得到如下结论:

1) 单U形埋管换热系统是性价比最高的埋管系统。

2) 双U形埋管换热系统的日均单位埋深换热量比单U形埋管换热系统稍高,至多不超过单U形埋管换热系统的30%。

3) 套管式换热器和单管型换热器的换热效果受地理环境影响较大,且与套管尺寸和规格有很大关系,使用前必须做现场的比对实验。

2 同一类型竖直埋管埋设深度与造价的关系

埋管形式按埋设深度不同分为浅埋(≤ 30 m)、中埋(31~80 m)和深埋(> 80 m)。

浅埋管优点是:投资少、成本低、钻机要求不高、钻井质量(如钻井垂直度)易控制,由于受地面温度影响,一般地下岩土冬夏季热平衡性较好。其缺点是占用场地面积大、管路接头多、埋管换热效率比中埋、深埋低。

中埋管介于浅、深埋两者之间,塑料管可用普通承压型。

深埋管的优点是:占用场地面积小、地下岩土温度稳定、换热效率高、单位管长换热量大、管路接头少。其缺点是投资稍有增加,钻机性能要求高,钻井技术要求严格。

1) 同一类型(以U形埋管为例)竖井埋管的造价组成以及与埋深的关系

竖井埋管的造价主要由材料费(管材及配件)、综合钻井费(人工及机械)、井内回填费(回填料及人工)三部分组成。当总换热量一定时,三者对不同深度埋管造价的影响如下。

① 材料费

换热量一定时,几种埋深的管材总用量变化不大。因地层分布规律一般为浅部土层、深部基岩,而基岩换热量优于土层,所以在总换热量一定的情况下,浅埋方案比深埋的管材和配件用料会相应增多。

② 综合钻井费

作为室外埋管造价的重要组成部分,综合钻井费也受很多因素影响,如地层的可钻性、钻井机具的合理选择、施工队伍的技术水平。

③ 井内回填费

井内回填费主要由回填料造价和人工费组成,在总换热量一定的情况下,人工费变化不大,主要是不同地层,回填料的材料选择和配比有所不同,但增加值在整个造价中所占比例很小,可忽略。

可以看出,三项费用中材料费和井内回填费与埋深几乎无关。但综合钻井费用与埋深关联密切。

2) 综合钻井费的影响因素

① 地层可钻性

地层的可钻性是衡量钻井过程中地层被破碎的难易程度,地层的可钻性不仅取决于地层自身的物理力学性质,还与钻井的工艺技术措施有关,所以它是地层在钻井过程中显示出来的综合性指标,是指导地质分层及钻头选型工作的重要参数,也是提高机械钻速、降低钻井成本的重要参数,地层的可钻性是决定钻井效率的基本因素。根据地层本身固有抗钻能力的大小,结合不同钻井方式,对地层的可钻性进行划分,几种常见地层的可钻性见表 1。

表 1 地层可钻性

地层	状态	对于传统钻机的可钻性
砂土层	松散状、可塑状	好
卵石	薄层	较好
	厚层	一般
漂石	稍密~中密	较差
基岩	软岩	强风化、中风化
	硬岩	强风化、中风化
不良地质(如溶洞/破碎带)	全充填	发育中等
	无充填	发育中等

结合地层的可钻性、项目规模等影响造价的相关因素,可大致对各单一地层钻井费用进行归纳,如表 2 所示。

地质条件纷繁复杂,在不同的地方、不同的深

表 2 单一地层造价

地层	市场价/(元/m)
砂土层	10~15
卵石	30~40
漂石	50~60
基岩	
软岩	30~40
硬岩	50~60
不良地质(溶洞/破碎带)	30~50

度内,都不可能只存在单一地层,岩性变化较大,一般情况以砂土层、卵石、基岩按照一定顺序排列,所以在竖直埋管施工过程中,根据地区不同、钻井深度不同,有可能会遇到全部土层或者大部分土层,局部卵石等多种组合,组合不一样,其施工难度、钻井成本等都会不一样,现假设无卵石(或薄层卵石)、漂石及不良地质,以 100 m 深度为例,将土层与基岩组合,其造价见表 3。

表 3 综合地层统计造价

地层情况	综合报价/(元/m)	备注
砂土层	24~45	根据施工场地作
砂土层+10%~20%岩石	42~54	业面、层位变
砂土层+30%~50%岩石	48~60	化、岩性不同
砂土层+70%~80%岩石	60~75	等因素综合考
砂土层+>90%岩石	75~90	虑

下面以砂土层+30%~50%岩石情况为例,假定地层情况见表 4,不同孔深对应的综合造价见图 2。

表 4 地层情况

层底深度/m	层底高程/m	层厚/m	岩土情况
2.00	24.47	2.00	杂填土:灰黄色,稍湿,松散状,颗粒组成杂乱,由碎石、砖块、混凝土及砾石、黏性土组成,土质均匀性差,碎块块径大小不一,20~85 mm 不等
13.47	13.00	11.47	粉质黏土:褐黄色,硬可塑,含铁质氧化物及灰白色钙质条纹,含少量砾石,砾石粒径以 2~10 mm 为主,含量约占 2%,表层 40 cm 为种植土,呈灰色软塑状粉质黏土
23.78	2.69	10.31	黏土:黄褐色,可塑,局部含少量细砂,含量约 10%
50.00	-23.53	26.22	粉质黏土:褐黄色,硬可塑,含铁质氧化物及灰白色钙质条纹,含少量砾石,砾石粒径以 2~10 mm 为主,含量约占 2%,表层 40 cm 为种植土,呈灰色软塑状粉质黏土
59.45	-32.98	9.45	砂质页岩:深黄色,强风化,原岩结构,构造大部分被破坏,尚能辨析,粉砂泥质结构,页理构造,岩芯多呈鳞片状,岩质软,遇水易软化,其中 7.2 m 以上呈紫红色
100.00	-73.53	40.55	砂质页岩:灰黑色,中风化,砂质结构,层状构造,30.9 m 以上夹灰岩呈互层状,厚度约 20~30 mm,岩体相对较硬

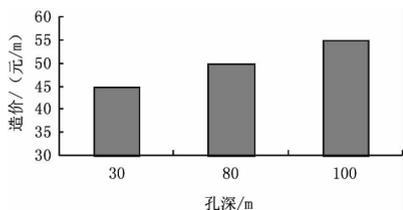


图 2 同样地层不同深度造价对比

② 合理钻井机具的选择和钻井工艺的确定

在钻井施工准备阶段,钻井施工人员会根据施工现场地质条件,配置合适的钻具类型和钻头,并根据不同深度、不同厚度的卵石层,制定不同的钻井工

艺。目前主要的室外埋管钻井机械有工程钻机和潜孔锤。工程钻机主要型号有 XY-150, XY-200, XY-150(增强型);潜孔锤型号是按所配置空气压缩机的容量确定,常用潜孔锤空气压缩机的容量为 10~30 m³。不同地层钻具选择见表 5。

合适的机具,科学的施工方法和工艺,及有经验的施工作业人员,是保证钻井质量和钻井施工效率的三大要素。

显然,在同一地层情况下,随着孔深的增加其综合造价会相应增加,但增加的部分不大且在可控范围之内。设计师在考虑竖直埋管深度时,应优先

表5 不同地层钻具选择

地层岩性		钻具	钻头
砂土层		工程钻机	合金/三叶/其他
卵石(浅部)	薄层(1~2)	工程钻机	合金/其他
	厚层(>2)	工程钻机	复合片/牙轮/其他
卵石(深部)	薄层(1~2)	潜孔锤	冲击器/其他
	厚层(>2)	潜孔锤	冲击器(跟管)/其他
漂石		潜孔锤	冲击器/其他
基岩	软岩(如泥岩)	潜孔锤	冲击器/其他
	硬岩(如花岗岩)	潜孔锤	冲击器/其他
不良地质 (溶洞/ 破碎带)	无充填	工程钻机	合金/其他

综合考虑工程的需求、供应量、场地地层及施工工艺等因素,结合每个工程实验井的特点,选择适合的埋管深度。

3 影响埋管换热效果的其他重要因素

1) 埋管的水平埋深

北方地区埋管的水平连接管的深度应在冻土层以下 0.6~1 m。南方地区埋管的水平连接管的深度应在年温度波影响之下。

2) 埋管的间距

文献[3]指出,竖直埋管在连续运行 300 h 之后,热扰动将趋于平稳,此时稳定层的扰动半径都趋于 1 m,而最远端边界半径正好是 2 m。

3) 持续运行时间和单位面积放热量

换热介质平均温度随运行时间延长而不断升高,由于埋管单位面积放热量不同,可造成达到系统运行控制温度的时间有差别^①。

4 地源热泵埋管系统的选择原则

综上所述,影响埋管系统选择的核心因素有:1) 建筑物周边的地理环境;2) 埋管换热系统的类型;3) 埋管换热系统的深度;4) 埋管竖井的水平间距。综合这四方面因素,埋管系统选择的原则如下:

1) 埋管的水平埋深。北方地区埋管的水平连接管的深度距地面不宜小于 2.0 m。南方地区埋管的水平连接管的深度距地面不宜小于 3.0 m。

2) 埋管的间距。埋管的竖井合理间距应不小于 4 m,有条件的区域应放大到 6 m。

3) 持续运行时间和单位面积放热量。持续运行时间越长,单位面积放热量越大,埋管的换热效果越差,直至埋管换热系统失效。对需持续不间断运行的空调系统,埋管应分区设置,增加 1/4 埋管的埋管余量,以实现埋管换热系统间歇运行。

4) 在条件允许的情况下,应首选单 U 形埋管换热系统。

5) 从施工的进度、难度和造价上看,竖直埋管深度宜小于 80 m。

6) 在平面竖井安排不下时,应首先增加深度,但竖井的深度不宜大于 120 m。

参考文献:

- [1] 杨敏,陈颖,史保新. 埋管换热器非稳态换热性能的实验研究[J]. 广东工业大学学报, 2008, 25(2): 22-25
- [2] 胡映宁,熊理国,刘渊. 不同垂直埋管形式地源热泵热水系统换热性能研究[J]. 工程建设与设计, 2012(5): 117-120
- [3] 胡志高. 土壤热泵垂直 U 型管温度场与扰动分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2006

^① 张冀豪,等. 水平埋管换热器换热能力实际测试比较. 暖通空调标准与质检, 2013