

地源热泵土壤换热器在建筑物下的工程应用

——当代万国城北区地源热泵系统之土壤换热器实施方案

刘 伟, 张文秀, 王吉标, 陈燕民

(北京市华清地热开发有限责任公司, 北京 100020)

摘要: 本文以国内首个埋设于建筑物结构底板下典型的地源热泵项目为实例, 结合设计和实施过程中的关键环节——测试实验和土壤换热器设计、施工中遇到的问题及解决办法, 较系统的介绍了地源热泵系统在建筑物下应用的可行性。

关键词: 地源热泵; 土壤换热器; 燃气热水锅炉; 联络管; 防水

引言

地源热泵是一种利用地下浅层地热资源(也称地能, 包括地下水、土壤或地表水等)的既可供热又可制冷的高效节能空调系统, 地源热泵系统通过输入少量的高品位能源(如电能), 实现低温热能向高温热能转移。地能分别在冬季作为地源热泵系统供暖的热源和夏季空调的冷源。冬季, 通过管路循环把地能中的热量“取”出来, 提高温度后, 供给室内采暖; 夏季, 把室内的热量“取”出来, 释放到地能中去。

由于地源热泵系统具有不受地下水位影响、高效、环保、无污染等等优点, 近几年来在国内得到了迅速发展。尤其在环保、节能的时代主题下, 建设部相继出台政策鼓励热泵技术应用, 地源热泵成为别墅和高档住宅项目的首选。

地源热泵土壤换热器一般埋设在建筑周边绿地、停车场下, 不占有地面空间。但是对于市区内项目, 一般土地资源紧张的, 没有足够的场地埋设土壤换热器, 这就导致地源热泵在场地紧张的项目中的应用受到限制。基于此我们通过深入开发、研究、设计、实施了国内第一个埋设于建筑物基础下的大型、高档住宅项目——当代万国城地源热泵工程。

本文通过对实施过程中的一些难点、要点进行分析, 以期对地源热泵技术的应用和发展起到一定的促进作用。

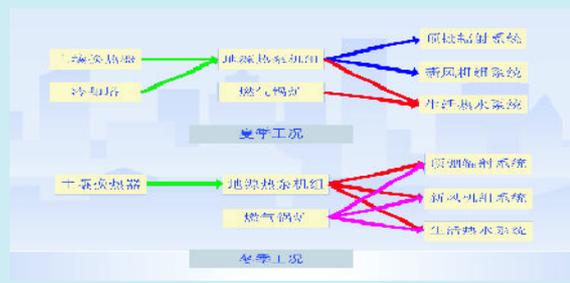
1. 工程概况

当代万国城二期地处东直门东北角, 占地面积1公顷, 总建筑面积约22万平方米, 地下室约55000 m²。本工程的目标是建设一座高舒适度、低能耗、健康、绿色、环保型的里程碑式住宅建筑, 它充分利用现有的建筑类高科技力量, 对其屋面、外墙、外窗、采暖、制冷、新风等进行了全面的系统的优化设计, 从而满足一部分人对高品质居住、办公、购物、休闲的要求, 在节约能源的情况下, 实现他们对高品质生活的追求。

2. 空调系统概述

系统设计充分考虑初投资和运行费用, 采用以地源热泵为主, 燃气锅炉和冷却塔作调峰的复合式系统。由于地处北京市核心地带, 没有场地, 因此将土壤换热器设置在车库底板下, 共计635组双U换热管, 埋深100米。

本项目的末端系统为顶棚辐射+新风系统; 地源热泵机组夏季的排热由土壤换热器和冷却塔完成; 冬季取热由土壤换热器实现, 不足部分采用燃气热水锅炉; 生活热水部分通过热泵机组热回收实现, 不足部分通过燃气锅炉提供。具体见下图。



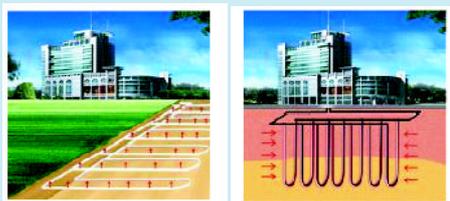
3. 土壤换热器系统设计

3.1 土壤换热器系统介绍

土壤换热器系统是由埋设在地下的PE管(高密度聚乙烯管)和循环泵及相关附属部件组成。地源热泵系统的土壤换热器埋置方式多种多样。目前普遍采用的有水平埋管和垂直埋管两种基本的配置形式。

水平埋管是在浅层土壤中挖沟渠, 将土壤换热器(PE管)水平的埋置于沟渠中, 并填埋的施工工艺。

垂直埋管是在地层中垂直钻孔, 然后将地下土壤换热器(PE管)以一定的方式置于孔中, 并在孔中注入填充材料的施工工艺。



水平埋管

垂直埋管

水平埋管目前国内还没有大面积推广，有效的实测数据也很少，参照国外的参考数据，水平埋管每米换热量取 8 w/m 。本项目最初设计考虑了 4000m 的水平换热管，水平埋管总热交换量为 32kw ，如此小的换热量在整个系统中所起到的作用可以说是微不足道，所以，在最终的方案中取消了水平埋管方式。

最终方案中采取了在地下二层车库的底板下面埋置土壤换热器的垂直埋管方式，共埋置土壤换热器的数量为 635 个。

3.2 土壤换热器的现场测试

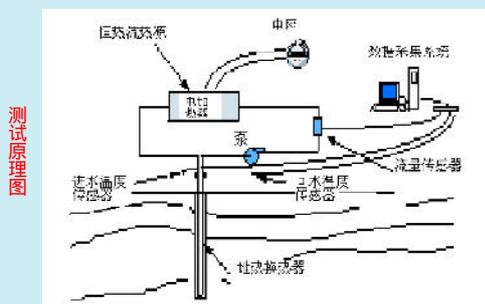
3.2.1 测试目的

为了使设计参数更加优化、合理，在现场采用我们自主开发的测试仪器对现场进行了换热孔的具体测试，具体的测试目的为：

- (1) 获取土壤换热器每延米的换热量。
- (2) 确定最佳的钻机机具。
- (3) 确定土壤换热器换热孔的最佳深度和合理间距。
- (4) 确定最佳填料。
- (5) 结合钻进难度，合理安排施工工期。

3.2.2 测试原理

该测试简单模拟地源热泵空调系统夏季制冷的运行模式，具体测试原理如下：将仪器的水路循环部分与所要测试换热孔内的 PE 管路相连接，形成闭合环路，通过仪器内的微型循环水泵驱动环路内的液体不断循环，同时仪器内的加热器不断加热环路中的液体。该闭合环路内的液体不断循环，加热器所产生的热量就不断通过换热孔内的换热管释放到地下。在闭合环路内的液体循环的过程中，将进 / 出仪器的温度、流量和加热器的加热功率进行采集记录，来进行分析计算土壤的热物性参数。其原理如下图：



3.2.3 测试内容

本次测试共钻了 3 个 120m 深的换热孔，且分别启用了三种不同的钻机进行钻孔，成孔后进行视电阻率测井。在其中的 2 个换热孔内分别下入双 U 型换热管后进行模拟测试。

3.2.4 测试结果

(1) 视电阻率测井结果表明本项目现场第四系的地层粘土较少、砂砾石居多，而且赋水率很高。

所以换热孔采用的最佳填料应该是级配砂石料，因为级配砂石填料的透水性好，不阻断地下水在换热孔处的流动，更有助于换热孔与周围土壤的换热，地下水流对换热管、填料及周围土壤的换热性能有很大的影响，也就是说级配砂石填料在这种赋水率比较高的地层中比其他填料的的效果要好。

(2) 测试中启用了三种不同的钻机，以下**为三种不同钻机的性能及实际钻进情况：**

三种钻机的性能及钻进情况

钻机	型号	性能特点	钻井时间	经济性
1000m 钻机	XY - 4	采用油压加压钻进，具有导向性好、稳定性强等特点。钻进方法为正循环回转式钻进，钻速由低到高可调空间较大。	32 小时 孔径 235mm 孔深 120m	成本低
黄河钻	SPC - 300H	采用油压加压钻进，钻具钻进过程中扭矩较大，钻进速度快，钻孔垂直度较高。	30 小时 孔径 245mm 孔深 120m	成本高
汽车工程钻	DT100	钻机适用于工程勘察，取芯取样方便，可做各种原位测试，更加方便了解地层情况，详细掌握工程地质资料。	34 小时 孔径 100mm 孔深 100m	成本高

通过以上对岩芯 1000m 钻、黄河钻和汽车工程钻在本项目现场的钻探比较，可以看出钻井速度最快的是黄河钻，其次是岩芯 1000m 钻，最慢的是汽车工程钻；岩芯 1000m 钻和黄河钻所钻孔径适合方便的下入双 U 型换热管；岩芯 1000m 钻的工程成本最低，综合分析后，本项目应该采用岩芯 1000m 钻。

(3) 利用专业软件模拟对地下岩土温度变化情况进行模拟，以获取换热孔的最佳间距。

测试结果表明， 0.5m 深度以下，距孔中心越近，排热工况下岩土温度场受影响程度越大，温升幅度越大， 0.5m 以下，不同深度温度变化幅度基本一致，同一时刻温升幅度随距孔中心距离增大而减小。模拟测试结束时，距换热孔中心 0.1m 处温度达到 29 ，温升幅度达 15 ，而距换热孔中心 2.5m 处温升幅度仅约为 0.01 ，距换热孔中心 3m 处温升幅度仅约为 0.002 。

距换热孔中心距离不同，温度变化速率也不同。距孔中

心越近，一开始温度变化速率大。随着作用时间的增长，温度上升速率变小，温度变化缓慢，而距孔中心较远处，温度变化速率的规律与上述正好相反。

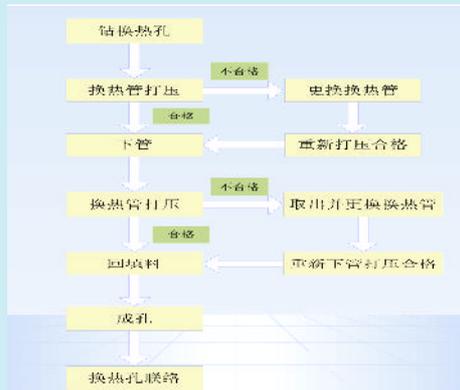
综合以上的模拟及分析结果，该区域土壤换热器的合理间距为 5m。

(4)孔深确定。由 120 米地层资料揭示该地区 100 米以下含卵砾石较多，且土壤换热器埋设于 -11.25 米的底板下，如仍按照 120 米深实施难度较大，将会造成成本加大、工期加长，因此综合考虑将深度定位 100 米深。

4. 土壤换热器的施工工艺

4.1 换热孔的施工工艺流程

4.2 水平联络管的设计及施工



本项目埋管的数量大，分布范围广，为确保每一个换热孔都能有一定的换热量流过，实现有效、高效换热，同时最大限度增加系统的安全性，根据换热孔的分布区域，按照相对集中的原则，将整个土壤换热器分为 42 个小系统，大约每 15 个左右的垂直换热孔设置为一个换热循环单元，供、回水分别集中到单独的分、集水器上；分集水器汇入总管接入机房，使得整个埋管的联络系统既统一又相对独立，从而实现高效、安全运行。

水平联络管采用 D90PE 管，整个土壤换热器系统按同程方式连接，确保各换热孔内循环液的流量、流速一致，为系统的安全运行提供可靠的保障。

5. 设计及施工难点

5.1 土壤换热器联络总管穿底板的防水问题

本项目换热孔 D32 管道经 D90 水平联络管汇集，穿结构底板进入检查井内的分集水器，各个分集水器通过管道汇集，最终进入到机房内与热泵机组相连。车库地下两层，底板标高 -11.28 米，共有 188 个 D90 管道穿底板。

底板防水在建筑工程中历来是个关键环节，通常采用柔

性和刚性两道防水层做法。目前图集和规范中均有穿外墙防水套管做法，但是还没有穿底板套管做法，此种做法在国内尚属首例，因此穿底板防水问题成为本项目的难点。

为了解决此问题我们专门成立了攻关小组，通过深入研究目前防水工艺、规范，通过请教设计院、防水协会专家、防水厂家，结合地热井井喷施工中的相关经验制作多个方案，通过多个实物模型承压能力对比分析等多种途径终于制定了一套切实可行的方案。方案经专家、设计、监理、业主、施工单位等参加的专题论证会讨论，得到一致认可。

此做法对柔性防水套管作了改进，采用上下两道压环，确保地下水不会通过管道和套管内壁渗入地下室。上下两侧压环压紧后可承担 8kg 压力，经过 1 个月的耐压试验没有渗漏。管外壁防水做法也经专家讨论制定了特殊的方案。

5.2 施工中对基底的扰动问题

由于埋管位于底板下，钻孔施工中的泥浆坑开挖、设备碾压、联络管管沟开挖等等均会破坏原状土，从而对基底产生扰动。一旦产生扰动不但增加处理费用，同时也将影响工期。为此我们在设计过程中对扰动进行了分析，分为必然产生的扰动和通过采取措施可以减轻和消除的扰动，对不同的扰动采取不同的处理措施。列表如下：

6. 小结

分类	扰动原因	采取措施
必然扰动	联络管管沟开挖	回填砂 + 级卵石，具体如图所示。
可消除扰动	泥浆坑开挖深度	预留 1 米覆土，泥浆坑深度控制在 0.9 米深以内
	泥浆渗漏	在泥浆坑和泥浆沟内铺塑料布以防渗
	车辆碾压	钻孔过程中预留 1 米覆土可解决碾压问题 在覆土开挖过程中，采用小型挖掘机，车辆倒退开挖和行进。 回填管沟过程中采用小推车，为防止碾压破坏基底，在车辆行经路段表面铺设木板。

目前该项目正在实施中，由于前期设计阶段考虑的比较完善，进展比较顺利，过程中也遇到了一些新问题，但都一一得到了解决。本项目作为国内首个埋设于基础底板下的地源热泵项目，它的实施使我们积累了很多经验，这对指导我们类似项目实施提供了很大帮助，也将对地源热泵在土地资源紧张的市中心实施和推广起到促进作用。CHF

作者简介

刘伟，男，工程师，研究方向：地源热泵。