

土壤源热泵空调工程的设计与施工

张燕立¹⁾ 张新发¹⁾ 由世俊²⁾

¹⁾(天津中冷暖通洁净工程技术有限公司) ²⁾(天津大学)

摘要 以天津市北辰科技园区某办公楼的工程为例,介绍土壤源热泵空调工程的设计和施工方法,探讨利用实验井的实测数据来确定土壤源热泵工程中的井位、井数、取热量和散热量,重点叙述土壤源热泵工程的设计步骤、可采用数据、地埋管的布置及强度等具体的设计计算方法。对热泵空调机房的设计也给出了相应的论述。

关键词 土壤源热泵 实验井 地埋管

Design and construction of ground-source heat pump and air-condition engineering

Zhang Yanli¹⁾ Zhang Xinfa¹⁾ You Shijun²⁾

¹⁾(Tianjin Zhongleng Heating Ventilation and Cleaning Project Technique Co., Ltd.)

²⁾(Tianjin University)

ABSTRACT This paper aims to introduce the design method and the construction program in the project of ground-source heat pump. The project of an office building in BeiChen Area of Tianjin has been mentioned as an example. The experimental wells have been tested to determine the number, position, heat input and output of wells. The main point of this paper is to discuss the design program, the reference data, the arrangement and strength calculation of the buried pipes in the ground-source heat pump project. The design of the heat pump room has also been referred to in this paper.

KEY WORDS ground-source heat pump; experimental well; buried pipe

土壤源热泵空调系统是一种使用可再生能源的高效节能、环保型的空调系统。该项技术在欧、美一些国家已非常成熟,正在被广泛应用。近几年土壤源热泵技术在我国逐渐被人们所重视,各科研机构和专业公司都在进行这项技术的研究、应用。天津中冷暖通洁净工程技术有限公司(以下简称天津中冷公司)几年前就开始研究土壤源热泵技术及其应用,取得一些经验,共完成三项工程的土壤源热泵空调系统的设计及施工,并已申请了七项国家专利(其中三项发明专利,四项实用新型专利)。下面介绍其中最大的一个项目与同行交流、研讨。

1 工程概况

天津市北辰科技园区“天津市中重科技工程有

限公司”综合办公楼是新建工程,建筑面积6232 m² 框架结构,主体四层,局部五层。建筑平面呈L型,层高3.60 m,各层均设有轻钢龙骨石膏板吊顶。空调末端为风机盘管系统。本工程原设计冷热源是采用风冷热泵冷热水机组,机组在局部五层建筑物顶上安装,循环水泵安装在一楼中部的水泵房内,冬季向末端系统提供45℃热水,夏季提供7℃冷水。甲方希望采用更节能的土壤源热泵技术,委托天津中冷公司变更设计及施工。在2004年冬季采暖期开始时系统竣工并投入运行,使用效果良好,经过冬季最冷月份测试,该系统的经济性得到展示,获得用户的满意和好评。

2 设计程序

* 收稿日期 2005-02-26

通讯作者 张燕立 E-mail: zzl@zhongleng.com

① 可行性性评估

本工程场院宽阔,有足够的使用面积,为采用土壤源热泵系统提供了必要条件。

本工程将一楼原风冷热泵机组循环水泵房调换到建筑物西南角作为空调机房。空调机房平面尺寸为 8.2 m×6 m。

② 确定地理管换热器形式

本工程地理管换热器采用双 U 型管,埋深 100 米。热泵工况参数见下表 1。

表 1 热泵工况参数

	末端系统供回水温度	地理管换热器进出水温度
夏季供冷	7~12℃	35~30℃
冬季供暖	45~40℃	3~5℃

③ 确定测试地理管换热器(以下简称试井,地理管换热器简称井)实测地理管换热器的取热量、散热量。计算地理管换热器数量。

④ 井位布置。

⑤ 水力计算确定管径及地理系统阻力。

⑥ 强度计算,确定地理管管材规格。

⑦ 地理管系统受力稳定计算,验算水平连管在土荷载、车荷载、堆放物荷载共同作用下的安全稳定性。

⑧ 地理管变形计算。

⑨ 选择热泵机组、末端循环水泵、地理系统循环水泵。

3 单井测试及井数计算

地质构造非常复杂,目前还没有见到根据地质结构直接计算出取热量、散热量的数据和方法,所以采用测试井实测地理管换热器取热能力、放热能力是目前切实可行的方法。单井测试设备是中冷

公司根据实际条件因地制宜制作的专用设备(已申请国家专利)。按前面提到的参数分别向不同的试井供冷热水,做较长时间运行使井下温度相对稳定,这样测得数据更贴近实际。通过大量实测数据进行整理分析,测得单井取热量为 4.50 kW,单井散热量为 9.13 kW。

原空调设计提供本工程冷负荷 510 kW、热负荷 480 kW。

1) 根据冷负荷计算放热所需井数:夏季机组 COP 取值 4。

$$N = [510 \times (1 + 1/4)] / 9.13 = 69.8$$

2) 根据热负荷计算取热所需井数:冬季机组 COP 取值 3.5。

$$N = [480 \times (1 - 1/3.5)] / 4.5 = 76.2$$

考虑多年后换热能力有可能衰减,目前国内尚无参考的衰减系数及附加系数,本工程实际确定地理管换热器数量为 80 个。

由以上计算可以看出本工程冬季取热过程决定了地理管换热器数量,应为 76 个,实际施工数量为 80 个,余富系数为 5%。

4 井位布置

有研究人员指出国外土壤源热泵工程,竖直地理管换热器间距取为 ≥ 4.57 m。天津中冷公司其他工程地理管换热器间距为 5~6 m,效果很好。本工程规模较大,井数较多,场院宽阔,单井测试群井工作,为留有余地,本工程诸井在厂区大车间南檐墙外东西成行布置,南北共 5 行,行距 6 m,每行中井距 7 m,最北面一行距大车间檐墙 3.5 m。具体布置见图 1。

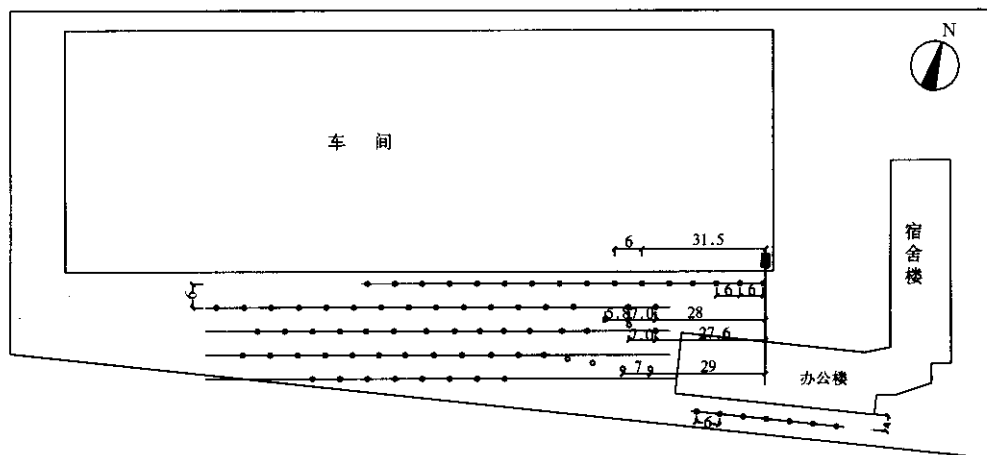


图 1 地理管换热器平面布置图

5 水平连管设计施工

所有垂直埋管换热器通过水平连管通入空调机房,实现埋管水系统的循环。

1) 通过计算、研究,认为水平连管的埋深度由以下三个因素确定:① 水平连管埋设深度处的地下温度应使水平连管不必做保温;② 与其他管线的交叉处,水平连管不允许出现竖向 U 形弯,否则排气困难;③ 由稳定计算和竖向变形计算校核确定。设计的埋深度一定要保证管道的受力安全。

本工程水平连管埋深均为 2 m。笔者估算天津地区地下 2 m 处的冬季地温为 7℃,夏季为 19℃,这个温度高于取热设计工况埋管换热器进出水温度,低于放热设计工况埋管换热器进出水温度,水平连管不须保温,没有不利热交换,这个深度与厂区其他管线标高均可错开,互不干扰。连管稳定计算、变形计算均满足要求。

2) 水平连管均采用热熔对接,水平连管与管件间采用电熔承插连接,双 U 型管换热器的 U 字弯,与管道采用热熔承插连接。本工程各种焊口共 2 000 多个,至今无一泄漏。

3) 水平连管敷设

① 管路槽沟由机械开挖,沟底预留值不小于 0.15 m,预留部分由人工清底至设计标高。管道应敷设在原状土地基上。

② 水平连管进水管做抬头泛水,最高点设排气管接至排气井。排气管末端装排气阀。本工程在场院内共设计 6 个排气井。

③ 连管在槽边连接后用弹性敷管法移入沟槽。

④ 管道敷设后经水压试验合格再进行回填。回填时管道中充满水。

⑤ 回填土分层夯实,管顶上部 0.5 m 以内的回填土用人工夯实,其他可由机械夯实。槽沟内具体作法如图 2 所示。

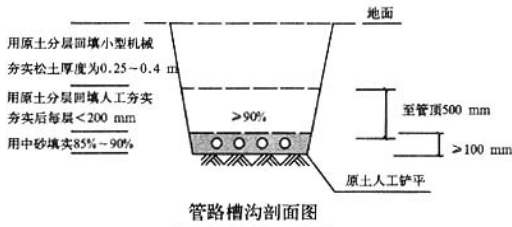


图 2 管路槽沟剖面图

4) 本工程将埋管换热器共分为 11 组,每组

7~8 个。各组由供、回水水平连管分别接至空调机房内埋管系统分、集水器。通过分、集水器上阀门实现对各组埋管换热的控制,这种方法容易调整各支路间流量平衡,同时一旦出现故障也便于查找事故出现部位。每个支路 7~8 个并接成同程式,使各个埋管换热器流量平衡。每个支路水平连管上设置放气装置。经运行调试观察,各组埋管换热器运行良好。

6 管材选用及计算

管材选用计算即强度计算。

埋管换热器及水平连管都使用聚乙烯管道(PE 管)。目前国内 PE 管管材的强度级别高低不同,同一强度级别管材壁厚也有不同规格。设计选用时在满足使用压力前提下,尽量选择低强度级别的管材,尽量选择壁厚小的管材以降低工程成本。管材强度级别要通过强度计算确定。

6.1 管材强度计算应满足下式要求

$$\sigma_{\theta} \leq r_{ot} f;$$

式中: σ_{θ} 为在设计内水压力作用下管壁截面上的环向应力设计值(N/mm^2); r_{ot} 为聚乙烯管管材抗力分项系数,可根据不同水温按表 2 确定。 f 为管材环向长期抗拉强度标准值,按下列数值确定:

$$\text{PE80 级管材} \quad f = 8 \text{ N}/\text{mm}^2$$

$$\text{PE100 级管材} \quad f = 10 \text{ N}/\text{mm}^2$$

表 2 聚乙烯管管材抗力分项系数

温度/℃	20	25	30	35	40
r_{ot}	0.96	0.89	0.84	0.77	0.71

6.2 设计内水压力作用下管壁环向应力设计值

σ_{θ} 按下式计算:

$$\sigma_{\theta} = \frac{F_{wd} D_o \gamma_{\theta}}{2t}$$

式中: F_{wd} 为管道设计内水压力标准值(N/mm^2),应采用管道工作压力 F 的 1.5 倍计算; D_o 为管道计算直径(mm), $D_o = d_n - t$; d_n 为管材公称外径(mm); t 为管壁计算厚度(mm); γ_{θ} 为设计内水压力的作用分项系数, $\gamma_{\theta} = 1.2$ 。

6.3 管道工作压力

6.3.1 竖直埋管工作压力(N/mm^2)

$$F = 0.01(H_1 + H_2 + H_3)$$

式中: H_1 为水泵扬程(m); H_2 为定压水箱液面至室外地坪垂直距离(m); H_3 为考虑到地下水对管道的径向压力抵消了一部分管道中水对管壁的向外径向压力。当地下水稳定水位高于垂直埋管换热器

下端时 H_3 为地下水稳定水位深度 (m); 当地下水稳定水位低于垂直地埋管换热器下端时, H_3 为垂直地埋管埋深 (m)。

6.3.2 水平连管工作压力 (N/mm²)

$$F = 0.0(H_1 + H_2 + H_4)$$

式中: H_4 为水平连管的埋深 (m) 本工程为 2 m。

根据计算, 本工程竖直埋管应选用 PE80, d_n 为 32 mm × 3 mm 塑料管材。为了节省投资, 根据市场材料货源情况, 经过经济比较, 特别制作了中冷公司专用埋管管材, 管径 d_n 为 32 mm × 2.8 mm, 材料级别 PE100, 管道设计成天蓝色。所有进出水管采用了不同的线条标识, 以防止接错方向。并且在管材上还印出长度数字, 在井孔中下管时, 从管上数字可直接读知实际下管深度, 工作十分方便。

U 型管换热器下端的 U 字弯, 也是天津中冷公司专门研制的专利产品, 施工方便, 使系统长期运行更加安全可靠。

6.4 水力计算

水力计算目的是为了合理选择系统管径, 计算系统阻力, 为选择循环水泵提供依据。水力计算时管中水流量应取冬、夏两种工况中较大流量进行计算。

国外资料指出, 竖直埋管中水流速建议不低于 0.6 m/s, 以防止管中结垢。管道的比摩阻应不高于 400 Pa/m。为防止水锤发生, 对不同管径管道最高流速也提出相应限制。

7 水平连管管壁截面环向稳定性计算

本计算的目的是校核所选用水平连管管埋地后, 在竖向土压力、地面堆积荷载或地面车辆荷载等不利组合作用下的安全可靠。

应符合下列公式:

$$F_{cv,k} \geq k_{st} \cdot q_{vk}$$

式中: $F_{cv,k}$ 为管壁截面的临界压力标准值 (N/mm²); k_{st} 为管壁截面的稳定性抗力系数; q_{vk} 为管顶处各项不利组合作用下的单位面积上竖向压力标准值。本计算十分繁杂, 计算量很大, 本文不在此赘述。

8 水平连管变形计算

8.1 竖向变形

水平连管埋地后在各种不利荷载组合作用下最大竖向变形应满足下式:

$$W_{d,max} \leq 0.05D_0$$

式中: $W_{d,max}$ 为聚乙烯管道在组合作用下的最大竖向变形 (mm); D_0 为聚乙烯管道计算直径 (mm)。

本计算也很复杂, 不再赘述。但从计算中发现, 要达到使管道变形符合上述要求, 回填土的密实度、回填土的施工方法很重要, 如不注意就可能出现。

8.2 纵向变形

当流过水平连管的水温发生变化时会产生纵向变形, 变形按下式计算:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t$$

式中: ΔL 为温度变化引起管道变形量 (mm); α 为聚乙烯管道线膨胀系数 (mm/(m·°C)), $\alpha = 0.15 \sim 0.20$ mm/(m·°C); L 为管道计算长度; Δt 为管道发生的最大温度差, 本工程为 35 °C - 3 °C = 32 °C。

例如: 管道长 100 m, 温度差取 32 °C, α 值取 0.15 mm/(m·°C)。

$$\text{变形量} = \Delta L (\text{mm}) = 0.15 \times 100 \times 32 = 480$$

这个变形量很大, 是钢管变形量的十多倍, 如不处理好就可能出现。

具体做法是: 管沟挖成一定宽度, 向沟内下管时使管道在沟底蜿蜒敷设, 利用管路弯曲自行补偿, 不设伸缩器。当然对较大的管径应设伸缩器, 为防止水平连管与竖直埋管作相对移动, 可在沟内设固定墩和止推墩。

9 空调机房设计

9.1 热泵机组

为了提高热泵机组在供热工况下的能效比, 要求尽量提高机组蒸发温度。系统运行费用的高低, 是用户首先关心的问题。供热工况地埋管换热器进出水温度已经确定, 即机组蒸发器进出水温度已经确定, 提高蒸发温度的唯一办法是减小蒸发温度与蒸发器出水温度的温度差。《采暖通风与空气调节设计规范》第 6.2.2 条指出: “卧式壳管式蒸发器, 蒸发温度宜比冷水出口温度低 2~4 °C”。一般冷水机组生产厂家设计蒸发温度比蒸发器出水温度低 4~5 °C。笔者设计制热工况时, 机组蒸发器出水温度为 3 °C, (地埋管换热器供暖工况进水温度为 3 °C)。这样机组蒸发温度要在 0 °C 以下, 要求地埋管系统循环水中要加防冻液, 这必然提高了工程费用, 同时对机房内金属管道及金属分、集水器要作相应的防腐处理。笔者要求热泵机组蒸发温度与蒸发器出水温度差 ≤ 2 °C, 此时蒸发温度在 0 °C 以上, 避免蒸发器内发生冻结现象。有两种方法解决此项矛盾, 一是加大蒸发器换热面积,

二是选用满液式蒸发器。从天津中冷公司设计施工投入运行的三个土壤源热泵空调工程运行实际看,都能安全运转,运行效果良好。

9.2 机房系统设计

机房内安装一个高架水箱,该水箱既是地埋管系统的膨胀定压水箱,又是末端系统的给水箱。

除末端系统分水器、集水器,机房内还装有地埋系统分水器、集水器。通过仪表可观察地埋管系统水温变化及系统阻力。通过阀门调整使各支路水力平衡。

在地埋管系统集水器的每个支路阀门前装有温度测孔,可分别观察每个支路回水温度,也可通过阀门调整各支路流量以使各支路回水温度接近,充分发挥每个地埋管换热器的换热功能。

供冷、供热工况转换由机房管路上 8 个阀门启

闭来实现。供冷时末端系统水流经机组蒸发器,地埋管系统水流经机组冷凝器;供热时末端系统水流经机组冷凝器,地埋管系统水流经机组蒸发器。两套系统各有专用循环水泵。

10 结 论

土壤源热泵设计中应该考虑土壤的地质条件及地下水水位的影响,必要时打实验井,利用实验热泵机组进行取热和放热实验,以便准确计算井数。

应该对埋管进行受力计算,确定合理材质和壁厚,以便降低工程成本。

水平管路回填土施工中,应充满水带压回填,以防管道变形。

以上是笔者在中重科技园工程中的设计、施工方法,供同行参考,不当处请交流指正。

参 考 文 献

- [1] 徐伟,等.地源热泵工程技术指南.北京:中国建筑工业出版社.
- [2] CJJ 101-2004 J362-2004.埋地聚乙烯给水管道工程技术规程.