地源热泵地下管群换热器设计施工技术点滴 *

重庆大学　王　勇☆　龙恩深　韦　强　陈金华

摘要　介绍了地源热泵地下管群换热器的常用型式,对 8 kW 地源热泵系统的地下管群换热器的设计、施工方法、系统的初投资和运行情况进行了详细分析和讨论。

关键词　地源热泵　管群换热器　设计　施工

Design and construction of pipe-group heat exchanger of ground source heat pump systems

By Wang Yong★, Long Enshen, Wei Qiang and Chen Jinhua

Abstract　Presents the common types of underground pipe-group heat exchangers. Analyses and discusses the design and construction method, initial investment and operation of a ground source heat pump system in which the capacity of the heat pump is 8 kW.

Keywords　ground source heat pump, pipe-group heat exchanger, design, construction

★ Chongqing University, Chongqing, China

1　概述

地源热泵以大地作为热源和热汇,热泵的换热器埋入地下,与大地进行冷热交换。由于地源热泵具有可持续发展性,近年来国内外正在加强对它的系统研究。

地源热泵原理如图 1 所示,埋入地下孔洞中的

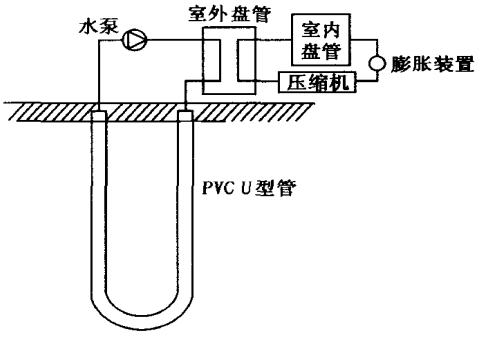

图 1　地源热泵原理图

换热管一进一回形成回路与大地进行换热。夏热冬冷地区平均地温为 15～20 ℃,通常冷凝器的夏季出水温度在 35～40 ℃之间,与岩土换热温差可达 20～25 ℃,有利于提高制冷系数,而且不会把热量、水蒸气及细菌等排入大气中,造成对环境的损害。冬季运行时,冷凝器作为蒸发器,经地下换热后蒸发器出水温度一般均高于室外气温,可显著提高供热系数,不存在空气源热泵随气温下降供热系数显著减小及结霜等问题。地源热泵在夏季利用冬季储存的冷量供冷,同时蓄存热量,以备冬用;冬季利用夏季蓄存的热量供热,同时蓄存冷量,以备夏用。夏热冬冷地区供冷和供暖天数大致相同,冷暖负荷基本相当,可用同一地下埋管换热器实现建筑的冷暖联供。笔者所在课题组在地下单管换热器的实验基础上,建立了一个 8 kW 地源热泵的地下埋管管群换热器,用于研究地下岩土换热的全年动态特性,为地源热泵的设计与运行提供理论依据

* 国家自然科学基金资助项目(编号:59778007)

☆ 王 勇,男,1971 年 8 月生,在读博士研究生,讲师
400045　重庆大学 B 区城市建设与环境工程学院控制科学与工程学院
(023) 66828333
E-mail: wyfree@263.net

收稿日期:2003-10-23

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

和可靠的基础数据。

从施工技术角度,地源热泵可以分为地下换热器施工和地上设备管道安装施工两部分,地上设备管道安装施工和传统暖通空调设备的施工技术一样,而地下换热器施工却是特殊的施工工艺,如处理不好,则会严重影响地源热泵系统的正常运行,甚至导致系统瘫痪。本文仅对地下管群换热器的设计及施工问题作一讨论。

2 埋管形式的确定

换热器埋管一般有两种形式,即竖埋管和横埋管。由于横埋管占地面积较大,且换热指标小于竖埋管,因此,在实验中以竖埋管为主要研究对象。

竖埋管一般可分为 U 型管和套管型两种,其结构形式见图 2。在前期的实验中已知套管型换热器换热能力大于 U 型管换热器,因此,在管群实验中,以竖直套管型换热器作为主要研究对象。

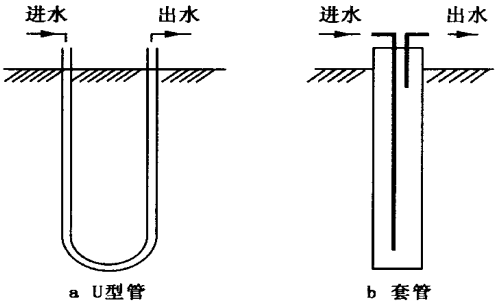

图 2 竖埋管形式

3 换热器管长计算及平面布置

根据前期夏季的实验结果[1],地下岩土为砂岩,经测试及查阅有关文献知,砂岩密度为 2 500 kg/m^3,导热系数 λ = 2.04 W/(m·K),热扩散率 a = 0.003 3 m^2/h,蓄热系数 s = 34.89 W/(m·K),在埋深 10 m 的情况下,单根套管换热器(外管直径 90～100 mm)在夏季稳定情况下的平均传热系数 K(其定义为换热器内水与大地初始温度每相差 1 ℃时,通过长度 1 m 的孔洞,每秒传递的热量)为 3.26 W/(m·K)左右。经测试和计算,重庆地区地下 1～10 m 处夏季的大地原始温度为 21.0 ℃,换热器内进出水温度取 40 ℃/35 ℃,平均水温 t_p = 37.5 ℃。则单位长度孔洞的换热量 q = 51.61 W/m,与实测值 49 W/m 非常接近。由于夏热冬冷地区热泵设计应以夏季降温为主,兼顾冬季供暖,一般地下管群的换热量冬季大于夏季,因此夏季能满足要求,冬季一般也能达到要求,故本装置按夏季工况设计。

根据如上实验结果,换热器设计了 15 根埋深 10 m 的套管,其换热量在 7 742 W 左右。另外,为了研究地下水平埋管换热器的换热规律,还建了两层 3 m ×4 m,埋深 2 m 和 1 m 的水平蛇形管换热器,其埋管长度为 50 m。

为避免热短路,换热器之间的距离有一定的要求,而确定这个距离要考虑多方面的影响因素,其中最重要的是换热器的运行时间。对于竖埋管换热器而言,换热模型是以埋管为中心的圆柱面辐射状向外传热建立的,且这种传热是以时间为坐标的不稳定传热。

前期对影响单根竖管换热距离的研究表明,一般影响单管换热的距离为 1.5 m 和 3 m。短时间和间歇运行的换热管间距在 1.5 m 较合适,长时间连续运行的间距在 3 m 较合适。为了研究不同管间距对管群换热的影响,该实验基地的埋管间距定为 1.5 m,利用阀门的切换来研究不同间距对换热的影响。埋管对称布置,其平面如图 3 所示。

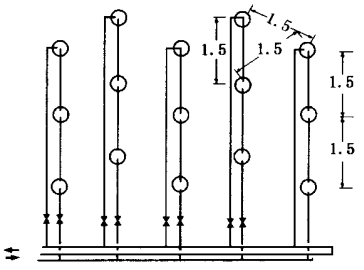

图 3 地下管群换热器平面布置

4 水环路系统设计

确定平面布置后,即可进行水系统设计。对于每一支管沟的三个孔,由于管道水平距离较近,因此考虑为串联式。即系统有五组串联支路,五组串联支路之间采用并联形式,每组串联换热器进出口均设截止阀与主管连接,以便单独对串联支路进行实验和调节。主管道安装在断面为 400 mm ×500 mm 的主管道沟里,水环路主管系统为同程式。

主管道进入室内后接水泵、板式换热器和空调器,膨胀水箱置于室内,构成一个水-空气热泵系统。在竖直埋管换热器的水进入板式换热器之前,还设计了一个可进入地板下平行管的并联环路,以供冷热地板实验用。系统连接见图 4。

5 管道材料

按照传热原理,地下换热器采用钢管传热效果较好,但考虑到长期埋入地下必须要使用长久,有良好的耐腐蚀性,因此钢管不适合;若采用耐腐蚀

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

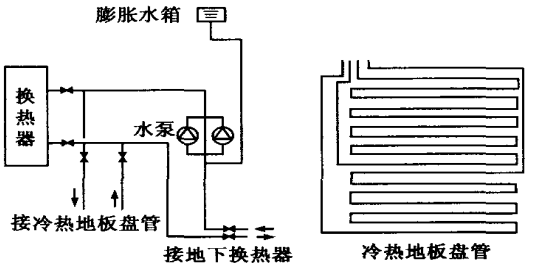

图 4 室内侧水系统连接图

性较好的不锈钢材料,则造价较高。综合以上因素,参照国外的使用经验,本试验装置管材全部采用聚乙烯塑料(PVC)管。

6 施工方法

6.1 施工前的准备工作

在施工前应对埋管位置的地质状况和地下管道沉降图进行研究,以确定钻机型式和埋管布局,还应清除地面上的杂草和杂物,将地表的浮土清除干净;然后放线,根据管道平面布置图确定钻孔的具体位置和系统各管道的标高;主管道沟的具体位置和尺寸确定后,即可开挖。在主管道沟末端开挖泥浆池,这样钻孔过程中产生的泥浆可顺管道沟积沉在泥浆池中。

6.2 钻孔及安装套管

当做好管道沟和泥浆池后,接通水源和电源,便可组织钻机进场,在钻孔区域离地 4 m 高范围内不应有任何遮挡物,以免影响钻塔的安放。在开钻之前先将钻孔位挖出 20 cm 深、2 倍钻孔孔径的小坑,以便钻机钻孔。

在钻孔过程中因钻头四周要喷注冷却水,会导致钻孔后大量水积在孔中,由于换热管为塑料空心管,浮力的存在对放管有一定的困难;另外,由于钻孔后泥沙的沉积,设计钻孔深度和实际深度可能不一致而影响放管深度。为此,换热器的组装应和钻孔相配合,制定严密的施工组织计划。即在钻完一孔前,套管必须组装好,在钻孔完毕后应尽快将套管放入孔中。在放完管后,要立即将水充满套管,以防由于孔内积水的存在,因浮力使套管脱离孔底上浮而达不到预定埋深。

6.3 管件及管道的连接方法

管路连接有焊接、承插和活接头三种方法。对于埋深不大或场地允许时,应在地面把套管连接好,然后利用钻塔进行放管,对于承插式连接一定注意要在活性胶干了之后才能使用。活接头连接优点是比较灵活方便,但造价较高。一般的管路和套管中的内管采用活接头连接,以利今后的检修。

由于该项目属实验性质,因此在套管放入钻孔以前,在套管外放置了一定数量的热电偶。在安放热电偶之处用细砂布把 PVC 管打磨光滑,然后把热电偶沿曲线方向紧贴管壁,涂上硬聚乙烯粘结剂硬化后,用防水绝缘带固定,外面再用透明胶带将其裹紧。

套管放下去后,将准备好的套头(含进、出水管)接头套在套管上,套头结构形式见图 5。

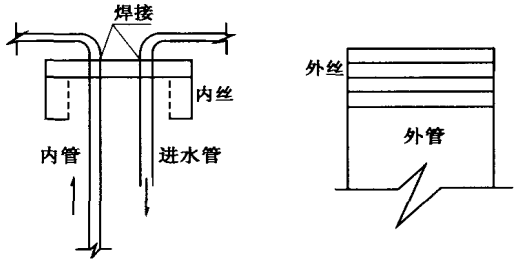

图 5 套管套头结构

6.4 施工中的几点体会

a) 对于壁厚小于等于 3.5 mm 的塑料管,不宜采用焊接,应该使用活接头或承插连接。对于埋管深度大于 10 m 的套管,使用活接头连接方法较好。

b) 对于壁厚大于 3.5 mm 的塑料管,宜采用焊接或采用活接头连接。

c) 在设有埋管的支管沟的施工过程中,应在钻完孔后再开挖支管沟连接水平管,若先开挖支管沟,钻孔有很大难度,这是因为钻机本身较重会压塌埋管管沟,而且支撑钻机和钻杆的支架支撑点选择较难,因此建议不要使用。

d) 由于套头上面的进出水管处采用活接头连接,压力较大,因此在试压中一定注意检测此处的漏水,这是本项目施工中的最大教训。

e) 在套头进出水管处应安装排气阀,防止地下水系统形成气阻,影响换热。

f) 换热器内管长度若小于 10 m 可一次性放入,因为内管较小且柔性较大;若大于 10 m 需以承插或活接头形式进行连接 。

g) 在施工前要规划好灌浆池,一方面可将钻孔过程中的泥浆集中在灌浆池中,另一方面可收集回灌灌浆填料。前期的实验表明,钻孔过程中产生

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

的泥浆是最简便、效果也较好的回填物。

h) 由于套管与钻孔之间存在缝隙,必须回填一些传热系数较高的物质,本实验装置采用钻孔过程产生的泥浆回填。在回填时必须从下到上间断回灌,以确保孔洞壁与管壁之间用回填物充满,确保其传热效果。

i) 应预留测试孔以监测地温的变化。

7 地下埋管造价分析

根据本项目的施工情况,其造价构成如下:

a) 钻孔费用:施工单位钻孔费用为 60 元/m,合计 9 000 元。

b) 开挖及回填管沟,开挖主管管沟,并加盖板费用为 750 元。

c) PVC 管(*DN*100 套管 150 m,内管及支管:*DN*20,20 m;*DN*16,180 m)包括活接头及阀门等费用为 1 160 元。

d) 水泵、膨胀水箱费用 450 元。

e) 人工及保温材料等费用 500 元。

该项目除水源热泵设备(改装)的总造价为 11 860元,其中钻孔费用占 75 %。

折合单位长度埋管造价为 79 元/m,按换热量 50 W/m 计,则单位换热量造价为 1.58 元/W(不含设备费)。为了降低地源热泵造价,降低钻孔费用是关键。

8 结语

该装置 1998 年 10 月投入使用,经过了 3 个冬季、3 个夏季、7 个过渡季的连续运行测试,整个系统运行正常。冬季室温保持在 18 ℃以上,夏季室温保持在 28 ℃以下,系统间歇运行,每天平均运行 7～9 h。通过两年多的运行测试,积累了数十万个测试数据,并得到了一些有价值的结论[2～5]。上述运行情况表明该实验装置建设是成功的。由于设计和施工问题在暖通空调工程中有可比拟性,因此本文介绍的 8 kW 地源热泵地下管群换热器实验装置的设计与施工经验带有普遍性,为全面推广地源热泵技术打下了基础。

参考文献

1 王勇,付祥钊. 地源热泵的套管式地下换热器研究. 重庆建筑大学学报,1997,19(5)

2 付祥钊,康宁,刘宪英. 冷暖地板换热性能分析方法. 暖通空调,2000,30(4):9－11

3 刘宪英,陈建苹,胡鸣明,等. 地热源热泵地下竖埋套管式换热器传热模型. 见:全国暖通空调制冷 2000 年学术文集. 2000. 153－159

4 何雪冰,王文,刘宪英. 地热源热泵冬夏暖冷联供试验. 见:全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集. 2000. 501－505

5 丁勇,刘宪英,胡鸣明,等. 地源热泵系统实验研究综述. 见:现代空调. 第 3 辑. 北京:中国建筑工业出版社,2001. 11－13

征订 ·

欢迎订阅《建筑技术及设计》(月刊)

《建筑技术及设计》(英文名《Architecture Technology & Design》,简称 ATD)是由建设部主管、中国建筑设计研究院主办、亚太建设科技信息研究院承办、中国建筑设计研究院建筑专业院和贝思出版有限公司协办的建筑专业学术期刊,创刊于 1993 年,主要刊登建筑设计优秀工程和精彩实例、技术产品应用方面的综述性文章以及创造性学术论文,突出专业性、实用性和时效性。本刊面向建筑学专业人群,注重建筑设计理论与实践相结合,介绍传播建筑专业知识和实践经验,设计手法及技术实现手段,推广工程新技术、新产品。办刊宗旨是促进国内外建筑界的学术与实践经验交流,推动我国建筑技术及设计的发展。

《建筑技术及设计》主要栏目有行业讯息、产品速递、专题探索、工程档案、方案篇、建筑游廊、每月话题等栏目。2005 年将增设名院、事务所采风,技术探讨,作品争鸣,人物访谈等内容,进一步提高文章内容的实用性、先进性,加强对一线建筑师关注的技术问题的报道,充分展示优秀的设计项目和设计理念,探讨设计作品和技术应用经验,向建筑师宣传推广建筑新产品、新设备,介绍国内外建筑新技术、新材料、新工艺。

欢迎订阅,欢迎赐稿,欢迎刊登广告!

联系地址:北京市车公庄大街 19 号《建筑技术及设计》编辑部 **邮编**:100044

电话:(010) 68302884 68325480

传真:(010) 68302884

E-mail:atd@xxy.cadreg.com

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.