



重庆地区

地源热泵系统技术应用

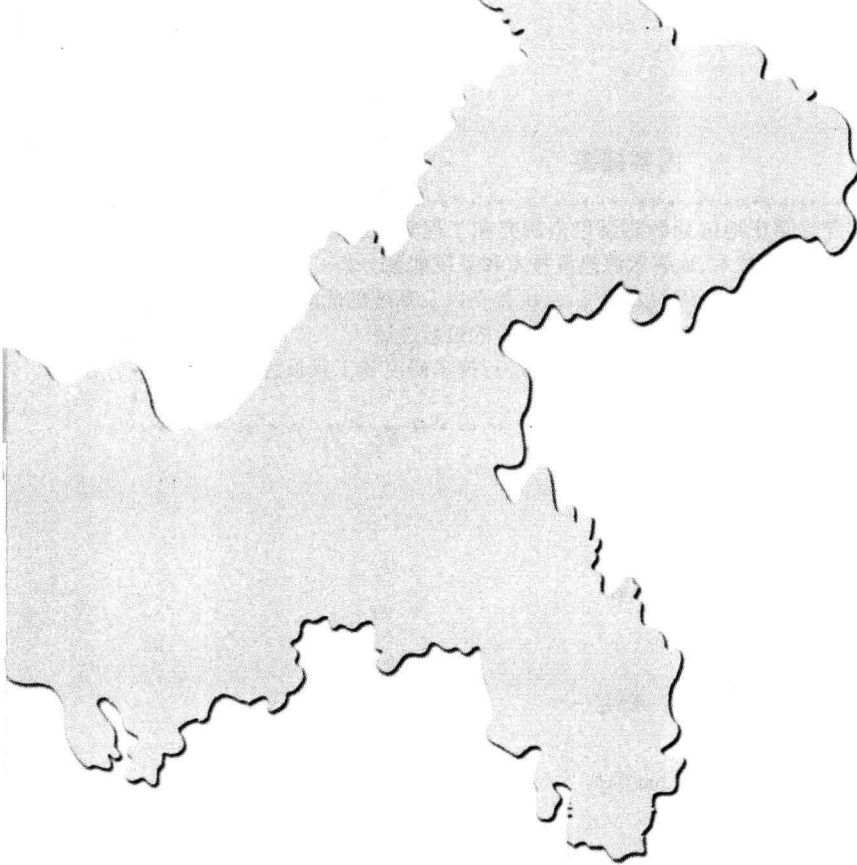
Application of Ground Source Heat Pump
Technology in Chongqing

丁 勇 李万战 著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>



重庆地区

地源热泵系统技术应用

Application of Ground Source Heat Pump
Technology in Chongqing

丁 勇 李百战◎著

重庆大学出版社

内容提要

本书是作者在总结多年来重庆地区地源热泵理论研究和工程实践成果的基础上著作而成的,全书涵盖了地埋管地源热泵技术、地表水源热泵技术和系统能效分析三个部分的内容,分别介绍了两种热泵技术在重庆地区应用的适用性、应用特点以及系统的能效分析方法和理论。全书突出理论研究和工程实践相结合,尽量反映该技术的最新进展。

本书可供从事地源热泵技术相关专业工程技术人员进行技术研究和工程设计使用,也可供相关专业院校师生参考和自学之用。

图书在版编目(CIP)数据

重庆地区地源热泵系统技术应用/丁勇,李百战著.

—重庆:重庆大学出版社,2012.4

ISBN 978-7-5624-6464-8

I. ①重… II. ①丁…②李… III. ①热泵—研究—
重庆市 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 258947 号

重庆地区地源热泵系统技术应用

丁 勇 李百战 著

策划编辑:林青山

责任编辑:王 婷 版式设计:林青山

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:181 千

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-6464-8 定价:22.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

序

我国正处于经济增长和城镇化快速发展时期,居民对室内舒适度的要求不断提升,建筑能耗呈现持续增长的趋势,同时,世界性的环境问题也正在突显。面对日益严峻的能源形势和环境危机,国家加大对可再生能源应用技术的推广力度,并制定了一系列节能降耗的目标与政策。地源热泵技术作为一种切实可行的可再生能源技术,是国家重点推广的可再生能源建筑应用技术之一。

暖通空调系统作为建筑领域的能耗大户,做好暖通空调系统的节能已成为建筑节能工作的当务之急。在暖通空调系统中使用地源热泵技术,能有效节省能源,减少环境污染和 CO₂ 排放,是一种可持续发展的建筑节能新技术。近年来,地源热泵技术在我国呈现出前所未有的发展势头和应用规模,国家多次出台相关的激励政策和财政补助措施,来促进该项技术的推广与应用。从国家出台的《可再生能源法》,具体到地方出台的《建筑节能条例》,无一不强调对地源热泵技术的应用与推广。

当前国内外对地源热泵技术的研究工作方兴未艾,对于地埋管地源热泵的研究主要集中在换热机理、强化换热和系统经济性等方面;对于地表水源热泵的研究则主要集中在取水技术、水处理工艺、防腐、防堵、防冲击、易清洗的高效换热水源热泵机组等方面;却较少有专门针对于某一地区的资源和系统特点进行的地源热泵技术研究,尤其是重庆地区,目前尚没有一本书籍针对地源热泵系统,对该地区的资源条件进行系统性的研究和分析。

随着地源热泵技术的持续推进和应用规模的不断增加,工程应用中突显出一系列问题,如资源分析不足,导致初期设计不合理,造成系统能效偏低等。由于地源热泵技术具有资源适用性特点,因此应该对使用地区的浅层地热资源进行研究了解,因地制宜地推进该技术的应用。

重庆市于 2009 年获批成为国家可再生能源建筑应用示范城市,计划 2012 年底实施 300 万 m² 的可再生能源建筑应用面积,目前正积极推广实施地源热泵技术。这本书突破性地从资源和系统的角度对重庆地区地源热泵技术的应用进行分析,为重庆地区的地源热泵技术的推进和工程的实施提供了很好的技术参照!

刘宪英

前言

随着人们生活水平提高,对生活环境质量改善的需求也不断提高,加之气候变暖、城市热岛等环境问题的凸现,空调系统在建筑中的作用越来越重要,需求也快速增加,给整个社会的能源供给不断施加更大的压力。提高非化石能源占一次能源消费的比重,大力发展可再生能源在建筑中的应用,已经成为我国应对能源紧缺,落实节能减排的一项基本工作。

根据《中华人民共和国可再生能源法》《民用建筑节能条例》等法律法规规定,当前建筑业的发展中要大力推动可再生能源应用,切实提高太阳能、浅层地热能、生物质能等可再生能源在建筑用能中的比重。建设部提出,到2020年,实现可再生能源在建筑领域消费比例占建筑能耗的15%以上;“十二五”期间,开展可再生能源建筑应用集中连片推广,进一步丰富可再生能源建筑应用形式,积极拓展应用领域,力争到2015年底,新增可再生能源建筑应用面积25亿平方米以上,形成常规能源替代能力3000万吨标准煤。

地源热泵系统作为一项可再生能源应用技术,由于其节能环保的优势,在国内正迎来前所未有的广泛应用。从2006年开始,财政部、住房和城乡建设部联合开展了可再生能源建筑应用示范工作,示范项目将作为我国可再生能源开发利用的标杆,推动更大范围的可再生能源建筑应用。重庆自2006年开始组织实施地表水源热泵、埋管地源热泵等可再生能源建筑应用试点示范工作,并建成南滨路世纪会娱乐城、北碚江舟渔港、金科天湖美镇等3个可再生能源建筑应用试点项目,共计面积约5000 m²。2007年重庆开始实施可再生能源建筑应用工程示范,现已组织实施了重庆大剧院、开县人民医院等6个国家可再生能源建筑应用示范项目,示范面积近50万 m²,并组织实施了彭水乌江明珠大酒店等4个市级可再生能源建筑应用示范项目,示范面积近8万 m²。2009年重庆市被确定为“可再生能源建筑应用全国示范城市”。截至2011年4月,在前期项目的基础上,重庆又新组织实施了18个示范面积共计314万 m²的示范工程,地源热泵技术应用在重庆已呈规模化发展的势头。



本书应重庆地区发展地源热泵技术的需求,对近年来重庆大学在地源热泵空调系统方面的研究成果进行了整理汇总,主要对岩土의 初始温度、热物性参数、平均地温和江水的水温、水质、水位等参数的原始值及变化规律进行了整理分析,为重庆地区地源热泵空调系统的工程应用提供原始数据,在此基础上对重庆地区地源热泵空调系统的设计及施工加以分析指导,并阐述了一些理论计算方法和数学模型。

本书主要从系统确定性因素、实验测定方法、基础数据和系统应用等几个方面对重庆地区地埋管地源热泵系统和地表水源热泵系统的应用进行阐述,并从系统能效结构、能效影响因素等方面出发,借助工程案例对系统能效进行分析。

全书共分为三个篇章,第一篇章主要介绍了地埋管地源热泵系统应用中的确定性因素(如岩土의 初始温度、热物性参数、平均地温等参数)的测试及获取方法,并对实地勘测的数据与理论计算数据进行对比分析,确定理论计算公式和方法,以指导工程应用。通过对实测数据的分析,建成工程应用数据库,为地埋管地源热泵系统的设计与施工提供依据。

第二篇章主要介绍了地表水源热泵系统应用中的确定性因素(如江水水温、水质、水位等参数)的测试及获取方法,并对实测数据进行分析,探索江水温度变化的规律,提出了江水温度的分析方法和模型,将测试获取的大量水温、水质及水位的原始数值及变化情况整理成数据库,为地表水源热泵系统的应用提供原始资料和设计依据。

第三篇章主要针对热泵系统的能效进行分析,对系统的能效结构进行拆分,分析了环境、资源、设备、流速等因素对系统能效的影响,提出合理判断系统能效性能的思路和方法,并结合实际案例进行分析,为地源热泵系统的合理设计和应用可行性判断提供方法。

本书是作者课题组历年来对地源热泵技术的理论研究和工程实践的总结,全书由重庆大学丁勇教授、李百战教授著作,刘宪英教授审稿,周世玉、贾宇等硕士研究生整理,得到了国家自然科学基金重点项目“建筑热环境动态调节与控制的理论与方法”的支持,重庆大学出版社负责本书的完善及出版工作,在此对所有参与本书成稿和出版工作的人员表示衷心的感谢!

作 者

2011 年 11 月

目 录

绪论	1
0.1 浅层地热源热泵空调系统的研究	1
0.2 浅层地热源热泵空调系统在重庆的应用	2
参考文献	3
第1章 地埋管地源热泵系统	4
1.1 系统概述	4
1.2 确定性因素获取分析	7
1.3 100 m 埋深换热测试	20
1.4 其他应用要点分析	33
参考文献	45
第2章 地表水源热泵系统	47
2.1 系统概述	47
2.2 确定性因素分析	49
2.3 江水参数测试	49
2.4 江水温度变化规律探索	57
2.5 系统要点分析	69
参考文献	79
第3章 系统能效分析	80
3.1 系统能效结构	80
3.2 系统能效分析方法	84
3.3 系统能效影响因素	85
3.4 系统能效耦合	101
3.5 系统能效评价的案例分析	108
参考文献	129
附录 热响应计算程序	130

绪 论

随着当今传统能源的日趋紧张和环境污染的加剧,在“节能减排”的国策指导下,地源热泵系统因其显著的节能、环保、高效等特点而愈加受到人们的重视。自 20 世纪 90 年代国内开展地源热泵技术研究以来,地源热泵技术研究在国内已经过了近 20 年的发展历程,并在吸收国外应用研究成果的基础上,取得一定的研究进展。重庆大学自 20 世纪 90 年代开始,结合重庆市的浅层地热资源特点,开展了一系列的理论与实践研究,积累了大量设计、施工及运行的数据资料 and 实际工程经验。

0.1 浅层地热源热泵空调系统的研究

根据我国《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2009)中的定义,浅层地热资源是指蕴藏在浅层岩土体、地下水或地表水中的热能资源。这些能源由于位于地表层,大多处于低位能源状态,为使之作为高位能源对建筑的环境做功,需要使用能源品味的提升技术,目前应用最广泛的是空调系统中的地源热泵技术。重庆市当前推广的地源热泵系统主要有地埋管地源热泵系统和地表水源热泵系统,重庆大学针对这两种热泵空调系统的工程应用开展了深入的研究工作,并结合近年来的研究成果,建立了指导工程应用的数据库。

在地埋管地源热泵研究方面,重庆大学(原重庆建筑大学)在 1990 年前后对“利用浅层蓄能横埋管道冷却或加热空气以改善室内热环境”进行了研究。1997 年重庆大学在“国家自然科学基金”的资助下搭建了包含浅埋套管换热器和水平埋管换热器的 15 kW 的地源热泵试验系统并进行了夏季供冷实验研究;1998—2000 年期间,重庆大学地源热泵研究课题组(以下简称课题组)使用该试验平台针对浅埋套管换热器的换热性能开展了冬夏季换热测试和过渡季地温恢复测试,并建立了地下浅埋套管换热器的传热模型;2003 年,课题组搭建了制冷量为 7 kW 的 50 m 单 U 形地埋管地源热泵系统,进行了原始地温测试和冬季供热运行测试,并采用线源理论及热阻网络分析方法建立了传热模型;2004 年,利用此系统进行了过渡季节地温恢复测试,并对



不同工况下的运行性能进行了分析,采用圆柱源理论模型对本热泵系统的运行性能进行了模拟;2008年,在“十一五”国家科技支撑计划项目的资助下,搭建了100 m 双U形地下换热器测试实验台,通过自主研发的地源热泵地埋管换热量测试仪进行了夏季和冬季工况换热量的测试,利用测试仪器分别测试得到了地下岩土不同深度的原始地温、不同工况下地下换热器换热量、岩土热物性参数等,对影响地下换热器换热性能的埋管形式、介质流速、温度等因素进行了对比分析,并结合国家规范的要求编制完成了地下换热器设计分析软件。

在地表水源热泵研究方面,课题组在“十一五”国家科技支撑计划项目的资助下,对长江、嘉陵江的水温、水质及水位等参数进行了全年逐月的测试研究,利用测试数据与气象资料的对比分析,探索了江水温度的变化规律,分析了江水源热泵系统的能效影响评价,为两江流域的水源热泵系统的合理设计提供了技术支撑,并结合重庆市示范工程的建设,开展了系统能效分析、设备匹配、取水方案选择、水质处理分析等问题的研究。

0.2 浅层地热源热泵空调系统在重庆的应用

目前,地源热泵空调系统在重庆市正处于大力度的推广和工程实施的起步阶段。2007—2008年期间,重庆市建委先后两次组织实施了可再生能源建筑应用示范工程项目,由于示范效果良好,2009年重庆市被建设部和财政部确定为“国家可再生能源建筑应用示范城市”。随着示范工程的建设 and 顺利运行,已经表现出的巨大的社会和经济效益,极大地推动了地源热泵空调系统在重庆地区的发展。示范工程项目涵盖了酒店、写字楼、会展中心、医院、住宅小区等不同类型的建设项目,主要应用了地表水源热泵、地埋管地源热泵两种地源热泵形式。其中,地表水源热泵的示范面积达到100万 m^2 ,地埋管地源热泵的示范面积接近50万 m^2 。通过对已运行系统工程的能效测试显示:夏季工况下,地表水源热泵系统运行的能效比均达到3.3以上,普遍为4.1~4.5;地埋管地源热泵系统运行的能效比均达到3.5以上,普遍超过4.0。冬季工况下,地表水源热泵系统运行的能效比基本达到3.0以上;地埋管地源热泵系统运行的能效比均达到3.0以上,不少工程超过了4.0,表现出了显著的节能效果。

随着示范工程项目的推进,地源热泵在重庆的应用也在继续升温,计划2012年示范工程的面积达到300万 m^2 以上。

但在浅层地热源热泵系统的工程应用中,基础资料的获取、系统的设计、设备的选择及运行参数的合理确定都对整个系统的高效节能运行起着关键性的作用。在本书中,我们将重点对地埋管地源热泵和地表水源热泵的基础资料、设计要点和系统能效进行分析和讨论。

参考文献

- [1] 刘宪英,丁勇,胡鸣明.浅埋竖管换热器地源热泵夏季供冷试验研究[J].暖通空调,2000(04).
- [2] 刘宪英,张素云,胡鸣明,等.地源热泵冬夏暖冷联供试验研究[J].水利电力施工机械,2000(01).
- [3] 胡彦辉.垂直深埋 U 形管大地耦合式地源热泵冬季实验研究与三维数值模拟[D].重庆:重庆大学,2003.
- [4] 群程英.50 m 深埋 U 形管地源热泵夏季性能测试及圆柱源理论模型[D].重庆:重庆大学,2004.
- [5] 何雪冰,丁勇,刘宪英.地源热泵埋管换热器传热模型及其应用[J].重庆建筑大学学报,2004,26(2):76-80.
- [6] 曾森.地源热泵地下换热器换热计算模拟和试验研究[D].重庆建筑大学硕士论文,1998:35-42.
- [7] 丁勇,李百战,卢军,等.地源热泵系统地下换热器设计讨论[J].地源热泵专题,2005(12).
- [8] 丁勇,李百战,卢军,等.地源热泵系统地下埋管换热器设计(1)[J].暖通空调 HV & AC,2005,35(3).
- [9] 丁勇,李百战,卢军,等.地源热泵系统地下埋管换热器设计(2)[J].暖通空调 HV & AC,2005,35(11).
- [10] 丁勇,李百战,单金龙,等.重庆地区地表水用于水源热泵空调系统的分析[A].全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集[C],2008.
- [11] 范芸青,卢军,刘强.重庆市某江水源热泵系统设计与分析[J].铁道标准设计,2008(S1).
- [12] 陈金华,刘勇,丁勇,等.重庆开县人民医院湖水源热泵空调系统实测分析[J].暖通空调,2008(08).
- [13] 陈金华,付祥钊,丁勇,等.重庆市开县人民医院湖水源热泵空调系统[J].暖通空调,2008(04).
- [14] 丁勇.浅层地源热泵空调系统在公共建筑应用中的能效研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [15] 曾森.地源热泵地下换热器换热计算模拟和试验研究[D].重庆:重庆大学,1999.
- [16] 连大旗,丁勇,李百战,等.地源热泵空调系统的应用研究[J].地源热泵,2009(05).

第 1 章

地埋管地源热泵系统

1.1 系统概述

1.1.1 概念及特点

地埋管地源热泵系统利用地下岩土为热源热汇进行供热制冷的地源热泵技术,以水或加入防冻剂的水为热载体,使其在埋于岩土内部的封闭环路中循环流动,从而实现与岩土的热交换。地埋管地源热泵系统主要有以下特点:

- 岩土温度全年波动较小且数值相对稳定,使热泵机组的季节性能系数具有恒温热源热泵的特性。这种温度特性使地埋管地源热泵比传统的空调系统运行效率要高 30% ~ 40%,节能效果明显。
- 岩土具有良好的蓄热性能,冬、夏季从岩土中吸收(或排放)的能量可以分别在夏、冬季得到自然补偿。
- 当室外气温处于极端状态时,空调负荷一般处于峰值。由于岩土温度相对地面空气温度的延迟和衰减效应,与空气源热泵相比,地埋管地源热泵可以提供较低的冷凝温度和较高的蒸发温度,从而可以在耗电量相同的条件下提高夏季的制冷量和冬季的供热量。
- 地下埋管换热器冬季供暖运行无需除霜,没有融霜的能耗损失,节省了空气源热泵融霜所消耗的 10% ~ 20% 的能耗。
- 地下埋管换热器在地下吸热与放热,不需要设置冷却塔,减少了空调系统对室外空气的热湿污染和噪声污染。
- 运行费用低。据世界环境保护组织(EPA)估计,设计安装良好的地埋管地源热泵系统相比传统空调系统,一般可以节约 30% ~ 40% 的运行费用。
- 地下埋管换热器对系统的供热制冷性能影响较大,长期连续运行时,冷热量

的累积会造成岩土温度的变化,进而影响到热泵的冷凝温度或蒸发温度。

- 岩土的热导率小,使埋管换热器的单位井深持续散热率仅为 $50 \sim 70 \text{ W/m}$,持续吸热率为 $25 \sim 40 \text{ W/m}$ 。当换热量较大时,埋管换热器的占地面积较大。

- 地下埋管换热器的换热性能受岩土的热物性参数的影响较大。计算表明,传递相同的热量所需传热管管长在潮湿岩土中为在干燥岩土中的 $1/3$,在胶状岩土中仅为在干燥岩土中的 $1/10$;岩石层的传热系数较岩土传热系数高 $20\% \sim 30\%$ 。

- 初投资较高。据统计,仅地下埋管换热器的投资就占系统投资的 $20\% \sim 30\%$,而这部分投资也是地埋管地源热泵系统较常规空调系统增加的投资。

地埋管地源热泵系统在设计和运行中,应尽可能保持夏季向地下累计释放的热量和冬季从地下累计吸收的热量相平衡,否则将会使岩土温度发生变化,降低地埋管换热器的换热性能,甚至使其失效。

1.1.2 原理及分类

地埋管地源热泵系统通过系统中的循环液(水或添加防冻剂的水溶液)在封闭的地下埋管中流动,实现系统与岩土之间的换热。在冬季供热工况下,循环液体从地下采集热量,再通过系统地上部分把热量送入室内。夏季制冷时系统逆向运行,即从室内带走热量,再通过系统地下部分将热量送到地下岩土中。因此,地埋管地源热泵系统保持了地源热泵利用大地作为冷热源的优点,同时又不需要抽取地下水作为传热的介质。系统主要由末端水循环系统、主机系统和地下埋管换热系统组成,如图1.1所示。

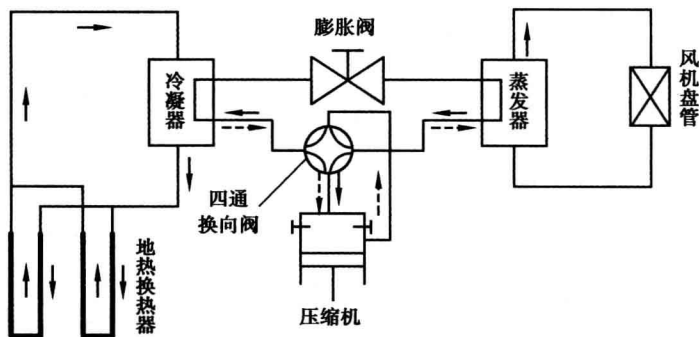


图 1.1 地源热泵的工作原理图(制冷剂换向)

- 末端水循环系统,主要由用户水泵、循环管路、切换阀门和风机盘管等组成。
 - 主机系统,主要由蒸发器、压缩机、冷凝器和蒸发调节阀组成,小型机组多采用四通阀进行制冷剂换向,实现冬夏工况转换。
 - 地下埋管换热系统,主要由地埋管水泵、循环管路、切换阀门组成。
- 根据地埋管敷设方式的不同可以分为竖直地埋管系统和水平地埋管系统。



(1) 竖直地埋管系统

竖直地埋管系统具有占地少、工作性能稳定的特点,是工程应用中的主导形式。根据埋管形式的不同,一般有单 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、套管式等形式;按埋设深度不同分为浅埋(埋深 ≤ 30 m)、中埋($31\text{ m} < \text{埋深} < 100$ m)和深埋(埋深 ≥ 100 m)。目前使用较多的是 U 形埋管,另外还有套管式和单管式埋管,如图 1.2 所示。

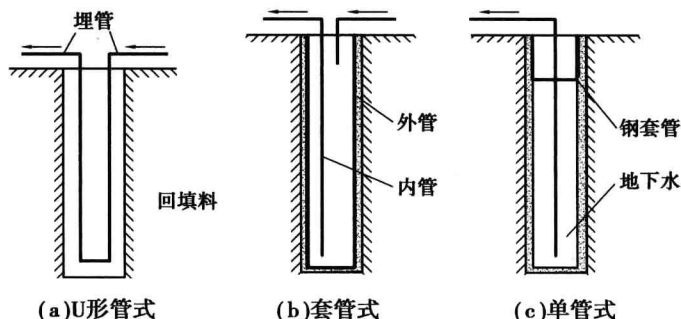


图 1.2 不同埋管形式

①采用 U 形管时,管井直径一般为 $100 \sim 150$ mm,井深为 $10 \sim 200$ m,U 形管径一般小于 50 mm(受流量所限,不宜过大)。U 形埋管具有施工简单、换热性能较好、承压高、管路接头少、不易泄漏等优点,是目前应用最多的埋管形式。在实际工程中还出现了把 U 形管捆扎在桩基的钢筋网架上,然后浇灌混凝土的做法,优点是不占用额外建筑用地且不需打井。

②套管式换热器的外管直径一般是 $100 \sim 200$ mm,内管直径为 $15 \sim 25$ mm。由于增大了管外壁与岩土换热面积,单位井深的换热量较 U 形埋管大。但缺点是:套管直径及钻孔直径较大,下管比较困难;初投资较高;套管端部与内管进出水连接处不好处理,易泄漏。因此,套管式适用于浅埋工程,在中埋或深埋工程中使用时应慎重。为防止漏水,套管端部封头宜由工厂加工制作,现场安装,以保证严密性。

③单管式在国外常称为“热井”,主要用于以地下水作热源的热泵系统,该种形式初投资较低。安装时地下水位以上部分用钢套管作为护套,钢套管直径和孔径一致,典型孔径为 150 mm;地下水位以下部分不加任何设施。孔洞中装有一根出水管为热泵机组供水,回水自然排放或回到管井内,这种方式的使用受到地下水资源和国家有关政策及法规的限制。

(2) 水平地埋管系统

水平地埋管主要有单沟单管、单沟双管、单沟二层双管、单沟二层四管、单沟二层六管等形式,如图 1.3 所示。由于多层埋管的下层管处于一个较稳定的温度场内,换热效率好于单层,而且占地面积较少,因此采用多层埋管的较多。近年来国内外又开

发了几种新的可用于水平埋设的管道,如图 1.4 所示。与传统埋管相比,新型埋管形式的优点在于获得相同的热量,所需地沟长度减小,管路的埋设视岩土情况而定,可采取挖沟或大面积开挖方法。根据文献[1]介绍,单层管最佳埋深为 0.8~1.0 m,双层管最佳埋深为 1.2~1.9 m,但均应在当地冻土深度以下。水平埋管由于埋深较小,换热器性能较垂直埋管差,而且施工面积大,在实际工程中,往往是单层埋管与多层埋管搭配使用。由于浅埋水平埋管受地表温度影响较大,地下岩土冬夏热平衡较好,因此适用于单季使用的情况(如欧洲只用于冬季供暖和生活热水供应)。

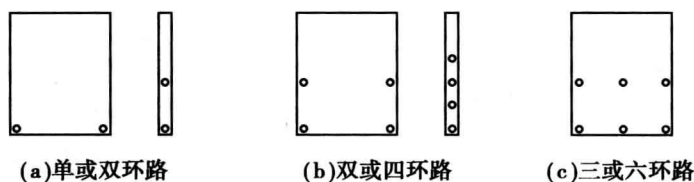


图 1.3 几种常见的水平埋管换热器形式

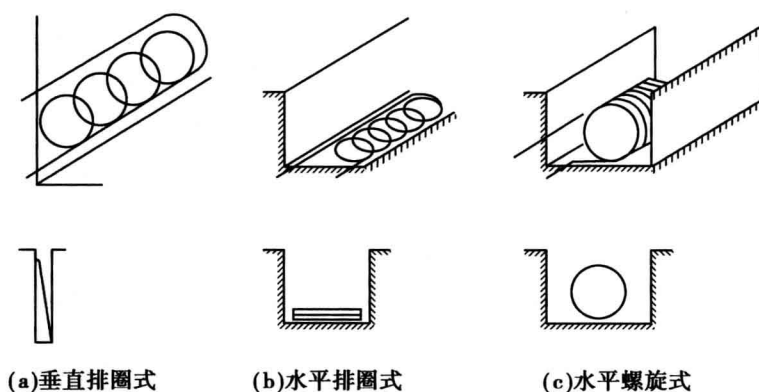


图 1.4 几种新近开发的水平埋管形式

1.2 确定性因素获取分析

由于地质构成、岩土热物性参数、浅层岩土的温度等因素直接影响着地埋管地源热泵换热系统的设计方案和运行效果,对地埋管地源热泵系统在建筑中的应用起着决定性作用,因此,在地埋管地源热泵系统方案设计前,应该掌握这些关键因素。获取这些关键因素的方法主要是通过工程场区内的地质勘查和岩土热响应试验得出,特别是对于空调面积 $\geq 5\,000\text{ m}^2$ 的建筑,在系统方案设计前应进行以上确定性因素获取的相关勘查和试验工作。



1.2.1 重庆地区地质情况概述

根据《重庆市1:50万地质图》等地质资料,并结合区域地层资料及重庆市相关埋管式地源热泵勘查数据,可以了解到重庆市属沉积岩广泛发育区域,出露地层总厚3267.2~6196.8m,其间以侏罗系红层厚度最大,三迭系次之,二迭系出露不全,第四系分布零星,其余各系则未见出露或根本缺失。

重庆主城区面积的80%以上是以泥岩为主,并与石英砂岩、砂质泥岩呈不等厚互层的结构,其间也较多夹杂页岩,偶见灰岩。由于泥岩、砂岩、页岩的岩质较为松软,根据《岩芯钻探规程》,土层可钻性等级为1级,泥岩可钻性等级为2~4级,砂岩可钻性等级为4~6级,以重庆现有的钻孔技术措施,若采用潜孔锤钻进,钻进速度可达1孔/天(80~100m)。在重庆主城区中梁山、歌乐山、南山等山脉隆起及其附近,地质构成以白云岩、白云质灰岩夹角砾状石、灰岩夹页岩的互层及砂质页岩夹薄煤层等结构为主,相对其他区域泥岩为主并砂岩互层的地质结构,地质较为坚硬,可钻性等级高,不宜钻孔施工。但这种不利于施工的地质类型主要分布于各山脉隆起及其条状山脉槽谷地带,与主城区主要建设规划区域并无明显重叠,可以说重庆地区总体上具备发展埋管地源热泵技术的有利条件。此外,主城区内地下水主要活动带一般集中于地表浅部,以风化裂隙水为主,红层孔隙裂隙水分布广泛,地下水丰富,对埋管地源热泵系统的运行非常有利。

重庆主城区以砂岩、泥岩为主的地质结构岩土传热系数在 $2.0 \sim 2.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,高于一般的黏土结构,当前重庆地区相关工程上广泛应用的100m双U形PE32的地下换热器,单位井深换热量夏季可达 $64 \sim 72 \text{ W}/\text{m}$,冬季达 $42 \sim 50 \text{ W}/\text{m}$ 。

参考《全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调动力(2003)》中的推荐值,考虑重庆地区夏季高湿高热的气候特征,夏季空调单位建筑面积的负荷参照表1.1中数值进行概算。

表 1.1 重庆地区建筑空调负荷概算表 单位: W/m^2

类 型	住 宅	办公建筑	商业建筑
空调负荷指标	100	130	200

由此可以得出单口100m双U形PE32的地下换热器可以在重庆地区供应冷热负荷的面积如表1.2所示。

表 1.2 单口100m埋深换热器可负担建筑空调面积概算表 单位: m^2

类 型	住 宅	办公建筑	商业建筑
单口井对应建筑面积	64~72	49~55	32~36

根据规范要求,换热器间距取 5 m,按图 1.5 布置方式,可以计算出单口竖直埋管井的占地面积为 21.65 m^2 ,据此可以估算出每 1 万 m^2 空调面积需要的地埋管面积如表 1.3 所示。

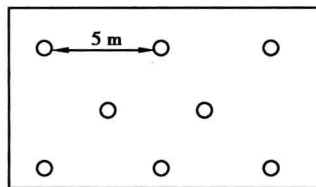


图 1.5 地源热泵地埋管布管形式

表 1.3 重庆地区建筑空调面积对应埋管面积概算表 单位: m^2

类 型	住 宅	办公建筑	商业建筑
1 万 m^2 空调面积 对应地埋管面积	3 010 ~ 3 380	3 940 ~ 4 420	6 010 ~ 6 770

1.2.2 获取岩土初始平均温度的方法

地埋管地源热泵系统主要是依靠地下换热器的管内流体,通过管壁与周围的岩土之间进行热量传递的,可以说岩土和换热管内流体的温差是传热的动力。因此,获取工程所在地的岩土温度及其变化特性是进行工程设计、地下传热分析的基础。但是影响岩土温度分布的因素很多,如大气温度、地表面风速、太阳辐射、地表面长波辐射、空气湿度、降雨量、地表面植被覆盖状况、地下岩土结构及物理性质,甚至地壳内部的热传导等,使精确岩土温度的获取比较复杂。工程上常用的岩土平均温度获取方法有现场测试和理论经验公式计算两种方法。

(1) 现场获取岩土初始平均温度的方法

工程上的地埋管的深度一般是 $50 \sim 150 \text{ m}$,考虑到地埋管与岩土的换热特点,为了简化测试和计算,常常是在深度方向取一个平均的地层温度来描述地下岩土的温度特性。《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2009)中对地下岩土初始平均温度的测试方法作了如下的规定:岩土初始平均温度的测试应采用布置温度传感器的方法,测点的布置宜在地埋管换热器埋设深度范围内,且间隔不宜大于 10 m ,以各测点实测温度的算数平均值作为岩土初始平均温度。测试须在测试孔完成,并放置至少 48 h 后进行。

温度测点的布置,可以设专门的监测井,监测井的设置应该深于或等于埋管深度,温度传感器需进行必要的加固和防水、防腐蚀保护,并均匀布置于监测井中,将监测井用回填材料进行密实回填后,待监测井与周围岩土换热充分进行后($\geq 48 \text{ h}$)进行地下温度的测量和记录。也可以在热响应试验孔进行下管施工时,将温度传感器



以间隔至少 10 m 的距离,附着于地埋管换热器的表面,同样需做固定和必要的保护,再同地下换热器一起埋入地下。这些温度测点除用作岩土初始平均温度的测量外,还将用于系统在运行期间的岩土温度变化监测。因此,保证温度传感器的防水、防腐蚀对传感器的运行寿命非常重要。

除了规范中推荐的方法之外,在目前的工程实践中,还有两种温度测试方法应用较为广泛。

一种方法是在已经埋设好且充满水的地下换热器内插入温度传感器进行温度测量。在回填施工结束 48 h、地下岩土与埋入的换热器换热充分平衡后,将温度传感器插入地埋管换热器中,由下至上或由上至下对不同深度的管内水温进行测量。此时测量的是地埋管换热器内不同深度的水温,以此来代替同深度下地埋管周围的岩土温度。这种方法不需要提前将温度传感器埋入地下,仅需在温度传感器前端安装小铅锤或其他重物,利用温度传感器导线的牵引将重物和传感器一起沉入管内水中。务必在导线上设置长度标记,测量的深度间隔也需在 10 m 以内,并以各深度实测水温的算术平均值作为岩土初始平均温度。

另一种方法是在回填施工结束 48 h 后,利用水泵驱动将地埋管内的水进行闭式循环,随着循环的进行,地下换热器的进出口水温度逐渐趋于相等且稳定不变,此时可认为地埋管内的水和周围的岩土换热达到了平衡,并以换热器进出口水的平均温度作为地下岩土的初始平均温度。这种测试方法往往是和岩土热响应试验同期进行的,待热响应实验台安装完毕,静置 48 h,待地下岩土、回填材料以及地埋管换热器及内部的水之间达到充分的热平衡后,仅启动循环水泵,使地埋管内部的水进行闭式循环,一定时间后,循环水温度达到稳定,可看作循环水和地下岩土换热达到平衡,循环水获得了与地下岩土相同的平均温度。图 1.6 为某地源热泵工程实地测试的结果。结果表明:通过在地下换热器内循环水测试获得的岩土初始温度为 17.4 °C。采用该方法进行测试期间应注意:由于水泵带来的温升,可能导致测试结果比真实值稍高,但此方法仍不失为一个测试地下岩土温度的有效方法。

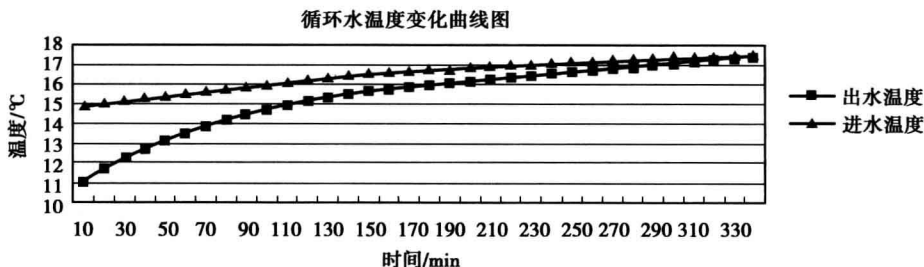


图 1.6 循环温度变化曲线图