

Theory and Technology  
Application of Energy Piles



# 能源热交换桩 理论与技术应用

由爽 编著

中国建材工业出版社

# 能源热交换桩 理论与技术应用

Theory and Technology  
Application of Energy Piles

由爽 编著

中国建材工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

能源热交换桩理论与技术应用/由爽编著. —北京:  
中国建材工业出版社, 2016. 4  
ISBN 978-7-5160-1391-5

I. ①能… II. ①由… III. ①地热能—热泵—研究  
IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 064132 号

## 内 容 简 介

能源桩是地源热泵应用的一种新形式,是将地源热泵的地下换热器融合到建筑结构的地基基础中,充分地利用混凝土良好的导热性能,与周围大地形成热交换元件。本书分别对能源桩系统的工作原理、传热理论、测试技术、施工技术、传热性能及结构热响应特征等进行详细介绍,并着重对 CFG 复合桩基在浅层地热能中的应用进行了分析,本书出版有助于推广和详解能源桩的技术优势,对于从事地源热泵技术及建筑节能技术研究的技术人员及研究人员亦具有重要的参考价值。

### 能源热交换桩理论与技术应用

由 爽 编著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 7.75

字 数: 153 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版

印 次: 2016 年 4 月第 1 次

定 价: 68.00 元

---

本社网址: [www.jcbs.com.cn](http://www.jcbs.com.cn) 微信公众号: [zjcgycbs](https://www.weixin.com/qzjcgycbs)

本书如出现印装质量问题,由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

# 前 言

在世界能源供应可持续性发展的背景下，建筑节能技术的推广应用势在必行，地热能等新型绿色能源的开发研究也已经成为一种趋势。地热能是来自地球深处的可再生性热能，目前对地热的利用主要为取用深层地热能进行供暖与地热发电等。随着近些年来地源热泵系统的广泛应用，浅层地热能已经引起了越来越多的重视，加速推动能源地下结构如基础底板、地下连续墙、桩基和隧道衬砌结构作为地下换热器的新型换热系统已迫在眉睫。

桩基埋管（俗称“能源桩”）就是地源热泵应用的一种新形式，将地源热泵的地下换热器融合到建筑结构的地基基础中，充分地利用混凝土良好的导热性能，与周围大地形成热交换元件。本书结合现场对能源桩结构换热性能的测试经验，综合叙述了地下换热器的理论模型，总结了能源桩施工技术，以及针对在换热过程中温度荷载、结构荷载和地下水渗流等方面对能源桩效能的影响，此外，针对能源 CFG 复合桩基工程实例进行深入剖析，力求理论与实际工程相结合、试验研究和工程应用相结合，对从事地源热泵技术及建筑可持续发展研究的技术人员及研究人员具有重要的参考价值。

本书的编写工作在北京科技大学完成，试验研究工作在清华大学程晓辉副教授指导下完成，感谢清华大学郭红仙副研究员、李翔宇、张志超、王浩给予的支持与帮助，感谢建筑科学研究院姚智全老师、张强的现场试验支持与鼓励，感谢北京科技大学纪洪广教授、王涛老师给予的支持与帮助，感谢李翔宇、高宇、张慧等在我的写作过程中提供的资料与帮助。特别感谢清华大学-剑桥大学-麻省理工学院低碳能源大学联盟（LCEUA）项目的支持。本书撰写过程中，参阅了大量国内外文献与同行工作，在此对他们的辛劳与工作一并表示感谢。

本书是结合本人博士后期间的研究成果和近几年工作中工程经验编写而成的。本人力求将最新的研究成果和信息奉献给读者，但由于水平所限，阐述的内容难免有疏漏和不妥之处，敬请专家和读者批评指正。

由 爽

2016年1月 北京科技大学

# 目 录

<b>1 能源桩地源热泵系统</b> .....	1
1.1 浅层地热能的利用 .....	4
1.2 地源热泵系统简介 .....	6
1.3 能源桩换热系统简介 .....	9
1.4 地下换热器埋管形式 .....	13
1.5 小结 .....	15
<b>2 地下换热器传热理论模型</b> .....	17
2.1 无限长线热源模型 .....	18
2.2 有限长线热源模型 .....	19
2.3 空心圆柱热源模型 .....	20
2.4 实心圆柱热源模型 .....	21
2.5 其他传热理论模型 .....	22
2.6 小结 .....	23
<b>3 能源桩换热性能测试技术</b> .....	24
3.1 现场测试分类 .....	24
3.2 测试仪器设备 .....	28
3.3 现场测试技术要求 .....	32
3.4 岩土热物性参数 .....	34
3.5 实验室测试方法 .....	35
3.6 案例分析 .....	37
3.7 小结 .....	38
<b>4 能源桩基埋管施工技术</b> .....	40
4.1 能源桩施工原则 .....	40
4.2 能源混凝土灌注桩施工技术 .....	40
4.3 能源 CFG 桩施工技术 .....	47
4.4 钢筋混凝土预制能源桩施工技术 .....	49
4.5 小结 .....	51

<b>5 能源桩传热性能及影响因素</b> .....	52
5.1 桩埋管换热系统传热性能原位测试 .....	52
5.2 桩身水泥水化热的影响 .....	55
5.3 加热功率对换热性能的影响 .....	56
5.4 循环水流速对换热性能的影响 .....	57
5.5 进口水温对换热性能的影响 .....	58
5.6 运行模式对换热性能的影响 .....	60
5.7 测试时长对换热性能的影响 .....	62
5.8 能源桩单孔换热量的设计分析 .....	63
5.9 群桩换热结构性能分析 .....	65
5.10 小结 .....	68
<b>6 能源桩结构响应特征</b> .....	69
6.1 能源桩结构性能 .....	70
6.2 在温度荷载作用下桩-土的相互作用机理 .....	71
6.3 在温度和结构耦合作用下的桩-土相互作用机理 .....	75
6.4 CFG 能源桩结构响应案例分析 .....	77
6.5 能源桩承载性能分析 .....	82
6.6 小结 .....	84
<b>7 地下水对能源桩换热性能的影响</b> .....	85
7.1 地下换热器有限元模拟 .....	86
7.2 含水量对岩土导热性能的影响 .....	87
7.3 地下水流动对地下换热器影响的理论背景 .....	88
7.4 三维有限元模拟地下水渗流对桩基埋管换热的影响 .....	90
7.5 地下水对能源桩的换热性能影响案例分析 .....	91
7.6 小结 .....	100
<b>附录 A 典型土壤、岩石及回填料的热物性</b> .....	101
<b>附录 B 聚乙烯 (PE) 管外径及公称壁厚 (mm)</b> .....	102
<b>附录 C 北京顺义地区能源 CFG 桩施工</b> .....	103
<b>附录 D 天津滨海湖能源桩施工</b> .....	105
<b>参考文献</b> .....	106

# Contents

<b>1 Energy pile geothermal heat pump system</b> .....	1
1.1 Shallow geothermal energy utilization .....	4
1.2 Ground source heat pump .....	6
1.3 Energy pile heat exchanger .....	9
1.4 Types of heat exchange pipes .....	13
1.5 Summary .....	15
<b>2 Heat transfer model of underground heat exchanger</b> .....	17
2.1 Infinite length linear heat source model .....	18
2.2 Finite length linear heat source model .....	19
2.3 Hollow cylindrical heat source model .....	20
2.4 Solid cylindrical heat source model .....	21
2.5 Other heat source models .....	22
2.6 Summary .....	23
<b>3 Energy pile testing techniques</b> .....	24
3.1 Field test classification .....	24
3.2 Testing equipment .....	28
3.3 Technical requirements .....	32
3.4 Thermalphysical parameters .....	34
3.5 Laboratory test methods .....	35
3.6 A case study .....	37
3.7 Summary .....	38
<b>4 Construction technology of energy piles</b> .....	40
4.1 Construction principle .....	40
4.2 Construction technology of concrete grouting energy piles .....	40
4.3 Construction technology of CFG energy piles .....	47
4.4 Construction technology of precast concrete energy pile .....	49
4.5 Summary .....	51
<b>5 Heat transfer capacity of energy piles and influence factors</b> .....	52
5.1 Field test of heat exchange capacity .....	52
5.2 Hydration heat of pile cement .....	55
5.3 Effect of heating powers .....	56
5.4 Effect of flow velocity of circulating fluid .....	57

## Contents

---

5.5	Effect of inlet water temperature .....	58
5.6	Effect of operation mode .....	60
5.7	Comparison of TRT and TPT steady states .....	62
5.8	Design method of energy pile .....	63
5.9	Heat exchange capacity of grouped CFG piles .....	65
5.10	Summary .....	68
<b>6</b>	<b>Structure response of energy pile .....</b>	<b>69</b>
6.1	Structure characteristics of energy pile .....	70
6.2	Pile-soil interaction mechanism under thermal load .....	71
6.3	Pile-soil interaction mechanism under thermal and mechanical coupled loads .....	75
6.4	Structure response of CFG energy pile .....	77
6.5	Ultimate bearing capacity .....	82
6.6	Summary .....	84
<b>7</b>	<b>Groundwater flow effect on heat transfer capacity of energy pile .....</b>	<b>85</b>
7.1	Finite element modeling of heat exchanger .....	86
7.2	Water content effect on thermal conductivity of soil .....	87
7.3	Theory of groundwater flow effect .....	88
7.4	3D finite element modeling method .....	90
7.5	A case study .....	91
7.6	Summary .....	100
<b>Appendix A</b>	<b>Thermal physical parameters of typical soil and backfills .....</b>	<b>101</b>
<b>Appendix B</b>	<b>Diameter and nominal wall thickness of PE tube .....</b>	<b>102</b>
<b>Appendix C</b>	<b>CFG energy pile construction in Shunyi Beijing .....</b>	<b>103</b>
<b>Appendix D</b>	<b>Energy pile construction in Binhai lake Tianjin .....</b>	<b>105</b>
<b>References</b>	.....	<b>106</b>



# 1 能源桩地源热泵系统

伴随着人类的进步和社会的发展,能源的需求量越来越大。在能源利用总量不断增加的同时,能源结构也在不断变化(图 1-1)。每一次能源结构的变化都会推动人类社会的进步和发展。从一定意义上说,人类社会的发展史就是一部能源结构的演变史。

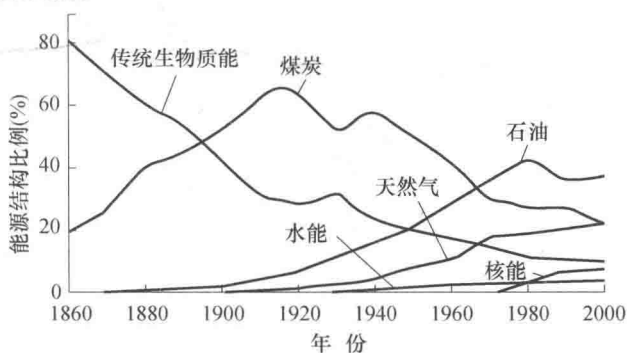


图 1-1 过去 100 多年世界能源结构变化<sup>[1]</sup>

能源资源的开发利用促进了世界的发展,同时也带来了严重的生态环境污染问题。化石燃料燃烧时产生的大量污染物,包括大量的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等有害气体以及  $\text{CO}_2$  等温室效应气体,引起了环境恶化、破坏生态平衡等一系列的问题,成为各国政府和公众关注的焦点<sup>[2]</sup>。科学观测表明,地球大气中  $\text{CO}_2$  的浓度已从工业革命前的 280ppmv 上升到了目前的 379ppmv,温室气体的大幅度增加使得全球平均气温也在近百年内升高了  $0.74^\circ\text{C}$ ,整体呈上升趋势,特别是从 20 世纪 70 年代开始,伴随着工业化进程的进一步增速,平均气温上升势头更加迅猛<sup>[3]</sup>。

近年来,全球能源消费不断增长,石油价格持续攀升,人们越来越担心世界能源供应的可持续性。目前,世界能源供应主要依赖化石能源。世界化石能源剩余可采储量还有较长的供应保障期,尚未对能源供给形成实质性制约。未来能源供求关系和市场价格,将主要受能源开采利用技术、能源结构调整、环境与气候变化、国际政治经济秩序等多种因素影响。据世界能源委员会的观点,化石燃料的高峰时代已经过去了。虽然石油、天然气仍继续保持主导地位,然而可再生能源和核能源所占的地位越来越重要<sup>[4,5]</sup>(图 1-2)。预计可再生能源将成为世界主要能源消耗的重要构成,到 2050 年可再生能源将提供世界主要能源

的 20%~40%，到 2100 年将提供 30%~80%<sup>[6]</sup>。

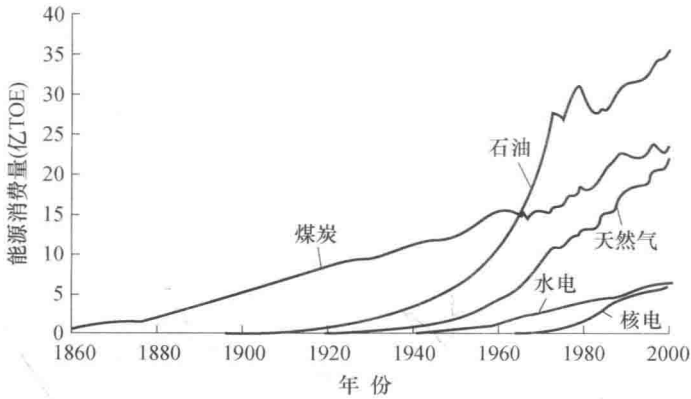


图 1-2 过去 100 多年世界能源消费变化<sup>[1]</sup>

为了减轻目前能源紧缺压力和环境污染问题，各国都在积极开发研究新型的绿色能源，可持续发展是人口、经济、社会、环境和资源相互协调的发展，是既能满足当代人的需求，而又不对后代人的需求构成威胁的发展。随后，世界各国都在可再生能源的开发和研究方面投入了大量的人力和物力，并且取得了一些阶段性成果<sup>[7,8]</sup>。欧盟已建立了到 2020 年实现可再生能源占有所有能源 20% 的目标，而中国也确立了到 2020 年使可再生能源占总能源的比重达到 15% 的目标<sup>[9,10]</sup>。21 世纪是全球追求可持续发展的世纪，也是绿色建筑的世纪，因而新世纪的建筑能源应该是可再生能源，在世界其他国家是这样，在中国也将是如此。

中国正处在建筑业高速发展的阶段，每年新建成的建筑面积达 20 亿  $\text{m}^2$  左右，是世界上最大的建筑市场，用于建筑物的能源消费逐渐上升<sup>[11]</sup>。推进建筑节能，政府办公用房、公共建筑设施应当先行，并引导居民住房和商业用房节能。建筑物节能技术的推广应用则更显得势在必行。

按所处空间位置的不同，可以简单地将建筑物划分为地上结构和地下结构。为了达到节能的目的，人们已经对地上结构采取了一系列的措施，比如在外墙的表面安置具有绝热功能的保温材料，这样就可以大大减少建筑物与外界空气进行的热量交换。然而地下结构过去只是单一地承担了力学功能的角色，随着科学技术的发展，地下结构（基础构件等）逐渐地发挥多重作用，不仅仅承担上部的荷载，还可以作为建筑物内部和地下土体之间的换热器，从而为建筑物供暖或者制冷<sup>[12]</sup>。

浅层地热资源<sup>[13~15]</sup>作为传统能源的辅助品甚至是替代品，由于其储量较大和广泛存在的特点，是一种具有极大潜能的可直接利用的再生能源。自 1855 年奥地利矿业工程师 Peter Ritter Von Rittinger 发明了热泵，地热资源被平板式或

浅挖式集热器和钻孔式热交换器收集利用,已在奥地利广泛使用多年<sup>[16]</sup>。1990年以来,在发达的阿尔卑斯山地国家,如奥地利和瑞士,建筑物和交通基础设施的基础结构构件,如基础的底板、桩和地下连续墙和隧道衬砌等开始被用来汲取周围地基土的地热资源。这一开创性技术,充分利用了混凝土材料较大的热容量,有效地实现了地基土存储或释放热能,形成了兼供热和制冷于一体的地热基础(Energy Foundation),是可持续发展的洁净能源革新技术,又具有显著的节能和经济的效果。最近五六年来,由于国外发达国家建筑节能与CO<sub>2</sub>减排的压力,该技术研究在英国、荷兰、德国等西方国家以及亚洲的日本迅速开展;与此同时,各国也相继出台并实施了一些鼓励性的政策法规,极大地推动了该技术的大范围推广。

近年来,为了推进浅层地热能的利用与地源热泵行业的发展,我国政府出台了一系列相关政策:

2006年1月1日,《中华人民共和国可再生能源法》<sup>[17]</sup>开始正式实施。地热能的开发与利用被明确列入新能源所鼓励的发展范围。

2006年4月,《国土资源“十一五”规划纲要》<sup>[18]</sup>出台,提出十一五期间要加大能源矿产勘查力度,“开展地热、干热岩资源潜力评价,圈定远景开发区”。

2006年8月,国家财政部发布的《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》<sup>[19]</sup>中明确提出“加强对可再生能源发展专项资金的管理,重点扶持燃料乙醇、生物柴油、太阳能、风能、地热能等的开发利用”。其中第二章有关“扶持重点”第七条中提出要扶持“建筑物供热、采暖和制冷可再生能源开发利用,重点支持太阳能、地热能等在建筑物中的推广应用”。

2007年1月,建设部发布《建设事业“十一五”重点推广技术领域》<sup>[20]</sup>,确定了“十一五”期间九大重点推广技术领域,其中“建筑节能与新能源开发利用技术领域”中重点推广太阳能、浅层地温能、生物能及其他能源利用技术;其中建筑节能改造技术重点推广供热采暖制冷系统节能改造技术。

2007年6月,国务院发布《国务院关于印发节能减排综合性工作方案的通知》(国发[2007]15号)<sup>[21]</sup>,明确提出要“大力发展可再生能源,抓紧制订出台可再生能源中长期规划,推进风能、太阳能、地热能、水电、沼气、生物质能利用以及可再生能源与建筑一体化的科研、开发和建设,加强资源调查评价”。

从2006年到2008年,按照财政部、建设部《可再生能源建筑应用专项资金管理暂行办法》<sup>[22]</sup>的规定,三年财政补贴共支持了255个可再生能源建筑应用示范项目,其中70%是地源热泵项目。以国家财政补贴的方式扶持可再生能源在建筑领域的应用,是新中国历史上的第一次。这是一个显著的政策信号:中国的建筑节能将走节流与开源并重之路,政府将通过投入激励和带动社会资金,拉动可再生能源在建筑领域中的应用,推动国家节能、环保战略目标的落实。2009年起,技术成熟经济性较好的地源热泵系统已经进入城市级示范阶段,标

志着可再生能源建筑应用规模化推广的开始。

目前,在建设浅层地热能利用系统前大多数没有开展地热能资源勘查和环境影响评价,从而造成能源利用效率不高,部分浅层地热能利用系统工程出现了明显的环境安全隐患。为了保证浅层地热能的合理开发利用,有必要结合地区发展建设和能源需求,进行浅层地热能资源调查评价,制定合理开发利用规划,确定有利的开发地段及适宜的开发利用方式,做到有序开发、合理利用、科学管理浅层地热能资源,系统开展区域浅层地热能资源评价,为政府统一规划浅层地热能资源、提高能源利用效率、保障能源安全的宏观决策提供基础依据。

## 1.1 浅层地热能的利用

地热能是来自地球深处的可再生性热能,它起源于地球内部的熔融岩浆与放射性物质的衰变。地热能的来源分为两个途径,一部分是来自地球外部,在地表以下约 15~20m 的范围内,由于受太阳辐射的影响,其温度有着昼夜、年份、世纪甚至更长时间的周期性变化,称之为“外热”;另一部分则是来自地球内部的热量,来自地球内部的熔岩,称之为“内热”。太阳的辐射热和地球内部热量之间的平衡关系决定了地球浅部的温度场,从地表向下大致可分为变温带、恒温带与增温带<sup>[23]</sup>(图 1-3)。

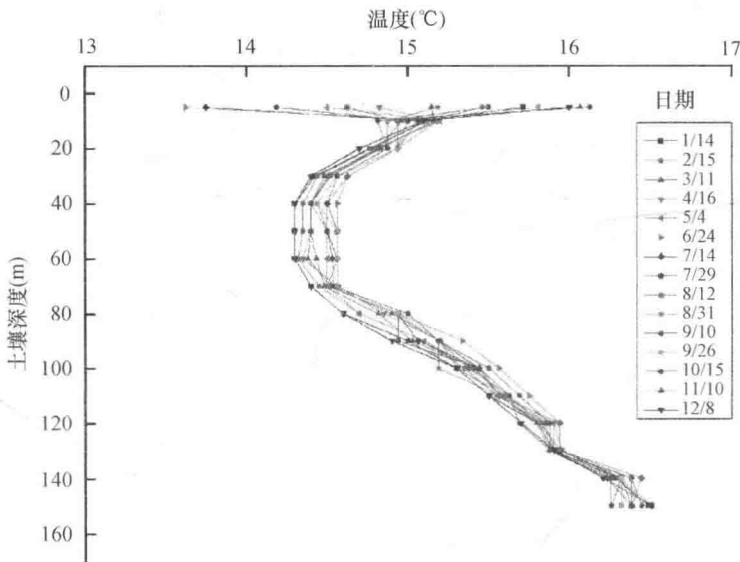


图 1-3 地层温带分布图

- (1) 变温带: 地球最表层的温度场受太阳辐射热的影响而发生变化。
- (2) 恒温带: 地球内热与太阳辐射热相互影响达到平衡。恒温带一般很薄,

在垂直方向上有时可视为一个面，恒温带内太阳日、月、年的辐射热影响很弱，温度相对保持恒定。恒温带的埋深和温度大小是进行地温预测与计算的一个基础数据，它主要随地球纬度而变化。其中欧洲恒温带的平均温度为  $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ ，而位于赤道附近的热带地区恒温带平均温度为  $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 增温带：此带的地温特性与温度变化主要受地球内部的热量所决定。一般为越往深处温度越高。

日常生活中所说的地热是从对自然出露的温泉、地球的火山活动等现象的研究中开始的。进入 20 世纪中后期，开始大量开发利用地热资源，对地热资源的利用主要限于地热异常区或有热储存分布的地区。

目前对地热的利用主要为取用深层地热能进行供暖与地热发电等。而随着近些年来地源热泵系统的广泛应用，浅层地热能已经引起了越来越多的重视。地源热泵技术的日趋成熟有力地促进了浅层地热资源的广泛利用<sup>[24]</sup>。近年来，各国浅层地热的开发利用规模和发展速度都在快速增长。从国外发展趋势看，开发利用浅层地热能（蕴藏于地球浅部岩土体中的低温能源），将是地热资源开发利用的主流和方向<sup>[25]</sup>。

综上所述，可将广义的地热资源按照所处位置的不同划分为以下三部分<sup>[26]</sup>：

(1) 变温带中的低温资源：位于地面表层，深度一般小于 30m（因地而异），热量来自太阳辐射能和地层深处的地热能。

(2) 恒温带中的地热资源：位于恒温带之中，较经济的开采深度一般小于 200m 的低品位的地热资源，温度略高于当地平均气温  $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ （或接近当地平均气温），变化范围较为恒定，储存于地下岩石（土层）和岩石裂隙或孔隙的水体中。浅层地热能的优点是分布广泛，在任何区域都储存在浅层地表中。

(3) 地热异常区的地热资源：分布于地热异常区（一般为天然温泉出露区）及隐伏于地下深部热储中具有开采经济价值的高品位地热资源。其来源为地球深部的热传导和热对流，储存于地下岩石（土层）和岩石裂隙或土层孔隙的水体中，温度随深度增加或离地热异常区的减小而增加，且大于  $25^{\circ}\text{C}$ 。

浅层地热能是蕴藏在浅层岩土体和地下水中的低温地热资源。通常指地表以下一定深度范围内（一般为恒温带至 200m 埋深），温度低于  $25^{\circ}\text{C}$ ，在当前经济条件下具备开发利用价值的热能<sup>[27]</sup>。

浅层地热能的能量主要来源于地球内部的热能（少部分来自太阳辐射），而这两种能源相对人类的历史来说为可再生能源<sup>[28,29]</sup>。从对浅层地热能的利用方式来看，冬季从地层中取出热量给建筑物供暖，而夏季吸收建筑物的热量释放到地层中储存，总体上能大致实现冬季、夏季地层的热量平衡，浅层地热能也因此可以得到循环利用。

## 1.2 地源热泵系统简介

热泵是通过做功使热量从温度低的介质流向温度高的介质的装置。热泵的概念最早在 1912 年由瑞士人提出, 1946 年第一个热泵系统在美国俄勒冈州诞生<sup>[6]</sup>。地源热泵系统是以岩土体、地下水或地表水为低温热源的既可供热又可制冷的高效节能空调系统。建筑物的空调系统一般需满足冬季供热与夏季制冷两种要求, 传统的空调系统通常需设冷源(制冷机)与热源(锅炉)。地源热泵系统利用浅层低温热源可对建筑物进行供热与制冷, 供应生活热水, 一套系统可以代替传统的锅炉加制冷机两套系统。通常地源热泵系统消耗 1kW 的电能就可以使用户得到约 3~4kW 的热量或冷量, 因此它不仅比电锅炉以及传统空气源空调系统运行费用低, 而且全年仅采用电力这类清洁能源, 大大减轻了供暖造成的大气污染问题, 而且由于热源温度受环境影响小全年较为稳定, 系统的稳定性也可得到保证<sup>[30,31]</sup>。地源热泵系统是利用深/浅层热能为低温热源的空调系统。与传统的空调系统相比, 其运营成本也相对较低, 因而最近几年用于建筑物的供暖制冷的地源热泵系统以 10% 的年增长率增加<sup>[32]</sup>。地源热泵系统被美国环境保护协会(U. S. Environmental Protection Agency) 认证为当今最环保、最舒适的空调系统之一<sup>[33]</sup>。

近年来, 浅层地热资源的开发利用发展迅速, 主要是采用地源热泵系统, 在空旷的场地中埋设较多的钻孔埋管式地下换热器, 利用浅层地热资源对建筑物进行供暖制冷<sup>[24,34]</sup>。地源热泵在日、韩、美及欧洲的应用较为普遍。据 2000 年的统计, 在家用供热装置中, 地源热泵所占的比例, 瑞士为 96%, 奥地利为 38%, 丹麦为 27%<sup>[35]</sup>。在中国, 北京是最早采用上述技术利用浅层地热资源的城市之一, 从 1998 年开始进行示范, 截至 2008 年底, 全市已有约 1300 万 m<sup>2</sup> (占当年供暖总面积的 2%) 的建筑利用浅层地热能供暖制冷<sup>[36]</sup>。目前, 沈阳利用浅层地热能的建筑面积已达到 1800 万 m<sup>2</sup>, 辽宁省已决定在全省推广应用热泵技术, 开发利用浅层地热能资源。总体而言, 我国浅层地热资源的开发利用与发达国家相比明显滞后<sup>[37]</sup>。

根据低温热源的不同, 可将其分为地理管地源热泵系统、地下水地源热泵系统和地表水地源热泵系统等<sup>[38]</sup>。水源地下换热器是地下水系统直接抽取地下水作为冷、热源, 然后经过循环利用后, 再回灌到地下。其优势为效率相对而言比较高, 劣势在于地下水可能会腐蚀或阻塞管道和机组换热器, 另外如果不能保证完全回灌和同层回灌, 会破坏地下含水层的结构, 严重的会导致地面下陷。而地表水系统主要从江河湖海中的水中提取能量, 即直接抽取地表水和将换热器置于地表水中。其优势在于节省投资和占地面积, 而问题主要是换热器结垢和对地表水源的污染。地源热泵交换器, 主要是钻孔埋管式交换器, 也有

水平埋管换热器。前者的优点在于挖沟槽的成本较低，安装比较灵活；劣势是需要大量土地面积，土体温度易受季节影响，土体热工特性随时间、外部环境的不同而不同。而后者最大劣势就是初投资费用较高、要占用一定的土地面积。地下换热器与周围土体之间进行热传递，从土体中汲取低品位的能源，然后通过热泵，使低品位的能源转化为可以为建筑物供暖或者制冷的高品位能源。

本书中主要对埋管地源热泵系统进行介绍。一个典型的埋管地源热泵系统由地下换热器（主回路）、热泵机组、室内暖通设备（次回路）三部分组成<sup>[39]</sup>（图 1-4）。

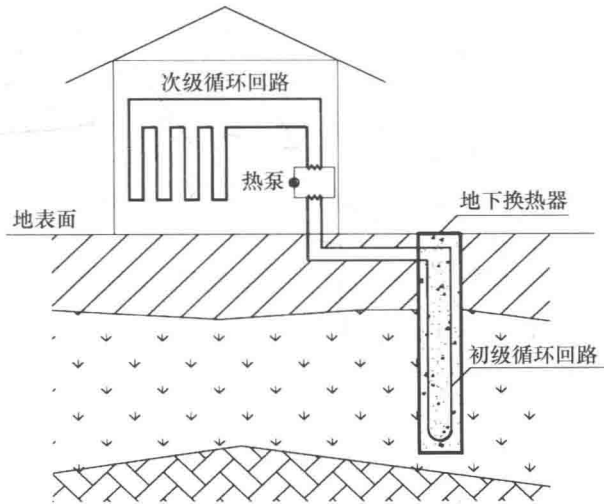


图 1-4 埋管地源热泵系统组成简图

主回路（Primary Circuit）是一个地下循环的闭合管路，其循环由一台低功率的循环泵来实现。闭合管路系统中是载热流体，如水、乙二醇、盐溶液等，最常用的是水—乙二醇混合液。它冬季从低温热源吸收热量，夏季向低温热源释放热量。

次回路（Secondary Circuit）即用于给建筑物加热或制冷的闭合管路。它一般埋置于建筑物上部楼板和墙中，也可应用于道路结构、站台和桥梁面板中。

主、次回路之间通过热泵机组进行连接，热泵机组主要由 4 部分组成：压缩机、冷凝器、蒸发器、节流阀（又称膨胀阀）（图 1-5）。

机组回路的循环介质称为冷媒，一般为氟利昂或其他环保油。在热泵机组中，冷媒的循环有以下 4 个工作过程<sup>[39]</sup>：

（1）在压缩机的驱动和压缩动力下，气态冷媒被吸进压缩机内，被压缩成高温高压的气态冷媒。

（2）高温高压的气态冷媒流入冷凝器。来自主回路的水与之进行热交换，水的温度升高，气态冷媒温度降低及液化。

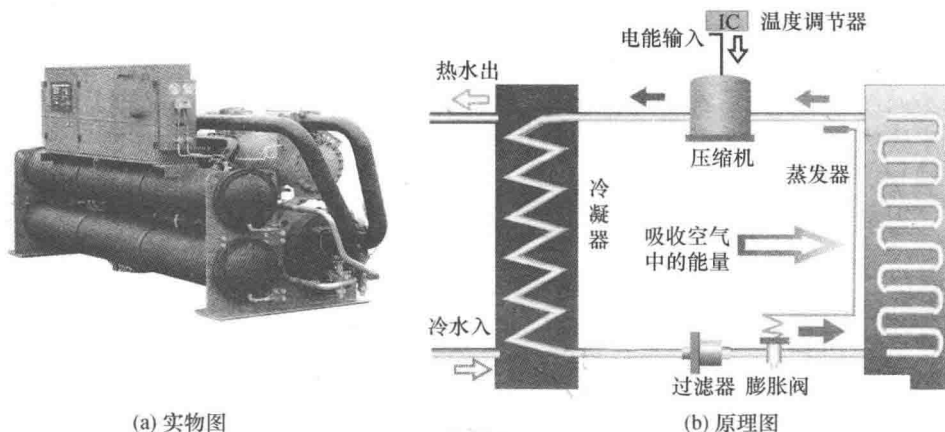


图 1-5 热泵主机实物图与原理图

(3) 液态冷媒通过节流阀，压力降低。

(4) 低压液态冷媒流入蒸发器，来自次回路的水与之进行热交换，水的温度降低，气态冷媒温度升高及气化。未完全气化的冷媒通过分液器实现气液分离，气态的冷媒被吸入压缩机内。如此周而复始地运行，通过冷媒的循环，实现了热量在主、次回路间的转移。

图 1-6 是一个典型的地源热泵空调系统的组成示意图，包括两台热泵，共有 V1~V4 四组阀门，阀门在冬夏两季的开、关见右侧说明。

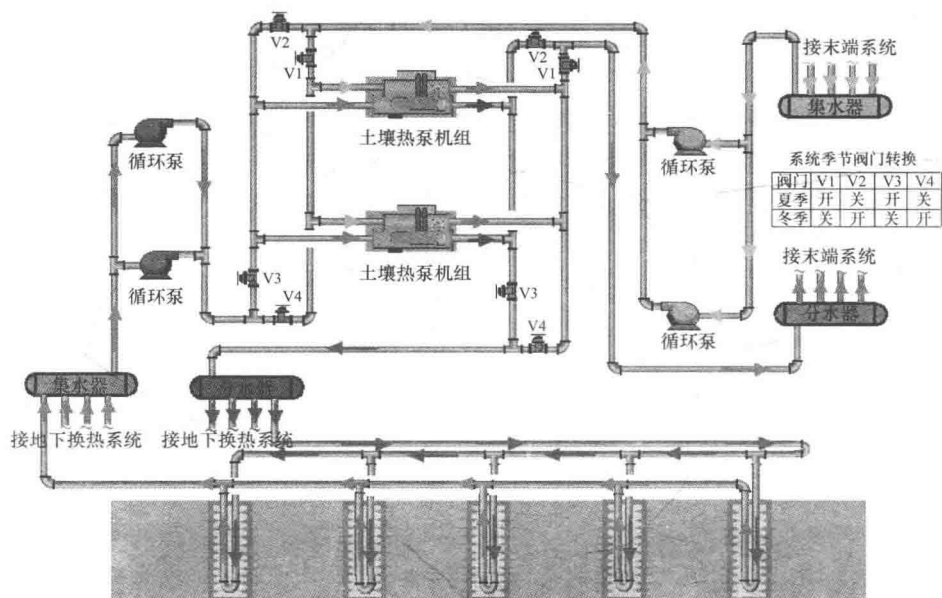


图 1-6 地埋管地源热泵系统运行简图



以夏季为例来说明地源热泵系统中主、次回路的连接：

地理管（主回路）中流体的出口接入左下角的集水器，经过循环泵，通过 V3 阀门流入热泵机组的冷凝器，被加热后，通过 V3 阀门流入分水器，最后流入地下主回路。

上部建筑（次回路）中流体的出口接右上角的集水器，经过循环泵，通过 V1 阀门流入热泵机组的蒸发器，被冷却后，通过 V1 阀门流入分水器，最后流入建筑次回路。

冬季时，则通过改变阀门的开与关，使得主回路流入热泵机组的蒸发器，次回路流入热泵机组的冷凝器。

### 1.3 能源桩换热系统简介

1855 年，奥地利采矿工程师彼得·里特尔·冯·里廷格（Peter Ritter Von Rittinger）发明了热泵，两年后，经证实安装在奥地利盐场的热泵每年可节省 293000m<sup>3</sup> 的木柴，自此，地源热泵系统开始在奥地利兴起。1980 年代初，能源桩系统由奥地利开始提出（图 1-7），继而推向瑞士和德国。能源基础也因此从最初的基础底板到能源桩（1984 年）和地下连续墙（1996 年），得到了初步的发展<sup>[6]</sup>（图 1-8）。

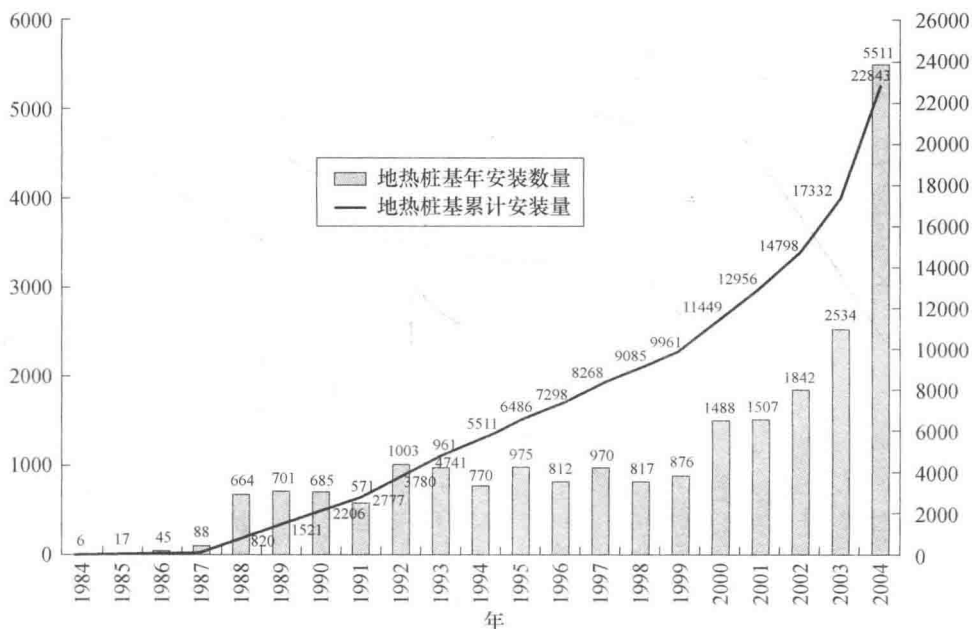


图 1-7 奥地利浅层地热桩基的发展情况