
地下含水层储能原理 及其工程应用

马 捷 著
上海交通大学出版社



国家自然科学基金资助

地下含水层储能原理及工程应用

马 捷 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是国家自然科学基金项目“储能地下含水层流动和传热特性的研究”的系统性总结。本书全面阐述了含水层储能的一般原理,建立了含水层储能耦合模型,研究了“冬灌夏用”、“夏灌冬用”的两阶段模型,介绍了避免发生储热井和储冷井间热导通的科学方法,论述了含水层储能系统的节能特性和经济性能,重点分析了储能系统功率和初投资的关系。本书共 10 篇 25 章。第 1 篇介绍了地下含水层储能技术的起源、发展和现状;第 2 篇探讨了地下含水层储能原理及其运行系统;第 3 篇研究了地下水的特征、流动和传热问题;第 4 篇涉及地下水运动和地下含水层储能的数值模拟;第 5 篇展示了含水层储能的实验研究;第 6 篇阐述了储能方案的比较和分析;第 7 篇具体讨论了储能系统的设计方法及优化。附录部分共三篇是相关的水文地质资料。

图书在版编目(CIP)数据

地下含水层储能原理及工程应用 / 马捷著. —上海:
上海交通大学出版社, 2007
(国家自然科学基金资助)
ISBN 978-7-313-04082-4

I. 地… II. 马… III. 含水层—储能—研究
IV. P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 138085 号

地下含水层储能原理及工程应用

马 捷 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 15 字数: 368 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—500

ISBN978-7-313-04082-4 P·077 定价: 35.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本书是地下含水层储能技术原理和工程实践的专著,是国家自然科学基金项目“储能地下含水层流动和传热特性的研究”(项目号 50278052)的工作总结和汇报。

地下含水层储能技术(ATES, Aquifer for Thermal Energy Storage)起源于 20 世纪 20 年代的上海,技术的发明权属于中国。国外针对含水层蓄能的研究起步于 70 年代早期,做了一系列理论研究。80 年代起,人们对 ATES 的兴趣大增,新建了一批利用太阳能、余热并结合热泵的研究性工程,其中 1981~1983 年是地下水储能发展的重要阶段,就在这段时期出现了一大批示范工程。80 年代后期,有关房间冷却的储冷也成为研究任务的一项。自 1990 年以来,在加拿大、瑞典等国相继建成配备储冷系统的工厂。

从国外后期建成的地下含水层储能项目来看,该项技术的最大优点是节能。采用天然的冷量或热量可显著地减小系统的电耗。结合地下含水层储能的空调系统的 COP 值高达 6~8,而常规的空调系统的 COP 最高也只能达到 4。与采用地下水直接冷却相比,采用这种系统使地下水资源得到了保护,还控制了地面沉降。此外,其所占的地面空间小,维护费用也少。

随着人类对可持续发展的进一步认识,对地球环境保护意识的进一步加强,ATES 将沿着上世纪开拓的道路,以更快的步伐前进。当前开展的国际合作研究,推动了利用自然的或人工储能装置的设计工具(包括硬件和相关的计算机应用软件)的发展。国际能源机构不同类型研发计划的实施,也积累了大量有关储冷、储热的工程经验和理论知识。日益完善的数学分析模型正用于 ATES 系统的观察、分析、设计和优化。ATES 在数学建模、工程实践以及经济、环境效益等方面,已经达到相当的水准。

地下含水层储能系统可以实现跨季节大规模能源的储存,综合优化利用各种能源,减少能源“瓶颈”对经济发展的限制。随着经济的发展和人民生活水平的提高,公共建筑和住宅的供热和制冷已经成为普遍的需求。在发达国家,供热和制冷的能耗占到社会总能耗的 25%~30%。地下含水层储能充分利用大气中的冷量和太阳能,实现对能源经济合理的利用,从而解决建筑节能问题。还可以用于工业过程冷却、路面融冰。它是一种可长期循环使用的能源系统,是一种可再生的能源系统。

地下含水层储能技术的应用,可以更加合理、高效地利用水资源。许多国家采用地下含水层蓄水的方法,实现水的地下储备,进而调节和缓解供水紧张局面。利用含水层人工补给的方法,不仅是一种可行、有效、费用低廉的供水方法,还可以改善水质。此外,人工补给地下水还可以控制海水入侵。地下含水层储能技术的研究,对于地下热水的开采和利用也具有指导作用。

地下含水层储能具有环境保护方面的意义,可以减少化学燃料(如煤、天然气、石油)的消耗,从而减少 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 等有害气体的排放。

地下含水层储能技术的关键,在于解决储能流体及热前沿的形状和位置、储能位置和含水层的选择、储能过程与环境的相互作用、储能系统的安全性、可靠性和经济性等问题。通过对地下含水层储能的基础理论研究,不仅可以为地下储能系统的建立提供理论依据,改变以往仅

凭经验的现状,而且也使该技术更加成熟,有利于该技术在相关领域的推广。另外,可以更深入地揭示地面沉降的原因,对地面沉降的防治有所帮助。

本书在总结国内外含水层储能研究的基础上,全面阐述了含水层储能的一般原理,根据地下水流动和热量运移的基本理论,在详细分析已有的含水层储能模型的基础上,从实用的角度出发,利用含水层流动和传热的基本公式,建立了含水层储能耦合模型,利用有限元方法对模型进行求解,利用模型对储能条件下含水层流动和传热情况进行了模拟分析,对比分析了耦合模型的特点和优越性。

本书着重研究了“冬灌夏用”、“夏灌冬用”这一普遍的含水层人工储能条件下能量运移的两阶段模型,简化了能量运移计算的复杂性,使这项技术更加走向实用化。

本书首次明确提出了解决同层储能条件下避免储热井和储冷井间热导通的科学方法。以两阶段模型为基础,分析储能用含水层具体的地质条件,合理布置储能井,有效利用地下水渗流耦合作用。在储能井间布置调节井,合理控制调节井的流量,使其和储能井的流量相配合,以主动控制储能水的波及范围,实现阻断储能井间“热导通”和储能井布置相对“紧凑”的效果。

本书对比分析了两类主要的含水层储能系统的特点,并给出双井封闭式含水层储能系统的设计方法。利用模型求解的结果和经验公式的结果,说明了含水层储能系统设计参数优化的方法。

本书从总体角度论述含水层储能系统的节能特性和经济性能,重点分析了储能系统功率和初投资的关系。

本书在理论研究的基础上,介绍了小型室内含水层储能实验台,通过布置在实验台内的模拟井来模拟含水层储能情况下,水的流动和传热情况。设计并进行了不同回灌温度下的储能模拟实验。

本书分析比较了各种储能方式的优缺点,明确指出地下含水层储能是值得推广应用的储能技术。

随着人类对可持续发展认识的进一步加深,对地球环境保护意识的进一步加强,含水层储能技术必将以更快的速度发展和应用。

在研究工作的基础上,本书还完成了以下工作:

确定了含水层储能的具体方案,包括单井的开启式地下水回路储能方案和双井的全封闭式地下水回路储能方案。

根据水文地质条件和气候特点,确定了储能系统的各种参数,如井的位置、井间距、抽用水量等。

在国家自然科学基金资助下本项目的完成,使我国的地下含水层储能技术可望再次处于世界领先的相当水平。

本书共 10 篇 25 章。

第一部分 7 篇,计 18 章,是直接的研究成果。

第二部分是附录部分,为水文地质篇,是为了方便读者在工程实践中参考应用而编排的。第二部分中,相当比重是我们的研究进展,也有一大部分是前人获得的成果。

储能地下含水层流动和传热特性的研究,与水文地质密切相关。这是我们较为生疏的领域。为了该国家自然科学基金资助项目的圆满完成,课题组必须跨越熟悉的范畴,借用众多水文地质专家有益的学术成果和数据资料。出于本书完整的考虑,将水文地质的材料作为资料

编排,以附录的形式组成独立的第二部分,以备查考。第二部分不按论著整体进行组织,而采用资料的样式。

在“储能地下含水层流动和传热特性的研究”项目的进行中,王明育参与了流动和传热动态过程数值模拟与控制的研究;赵新颖参与了储能对环境影响评估的研究;戴斌参与了储能总体方案分析与实验的研究;张建栋参与了储能总体方案优化的研究;郝振良参与了储能过程对地质环境影响的研究;王锦程参与了 ATES 系统分析、应用及控制的研究;朱国平参与了储能系统热量运移及储能效率评价的研究;罗一鸣参与了含水层储能对地面沉降和地下水水质影响的研究;黄诞参与了地下水储能流动建模与仿真的研究;陈健参与了储能过程对周围环境影响的研究。

上海交通大学方面,陈端石教授为该项目的顺利完成营造了良好的环境和氛围;徐筱欣教授提供了充分的方便和条件;万曼影教授给予了有力的支持和关心;许德兴技师完成了试验台的全部搭建、调试和运转工作。杜乐乐和倪园芳协助完成了本书章节、目录的编制和整理。

上海市地质调查研究院方面,方正高级工程师和沈新国高级工程师,给予了热情的支持和详尽的咨询。

由于课题门类深广交迭,涉及领域有疏有远,参与成员流动更替,以及限于编者认识能力和学术水平,疏漏缺失、欠妥欠当、差错谬误,无可尽免,未及送专家同仁审核勘正,实属缺憾。

从 2002 年 10 月开始着手准备,到 2006 年 3 月结束,国家自然科学基金项目“储能地下含水层流动和传热特性的研究”,历时三年有半,终告完成。根据原定计划,现组织出版专著,总结地下含水层储能技术的相关原理、理论和工程实践,至有此书。衷心感谢国家自然科学基金委员会,慨然批准了我们提出的项目申请,系统、全面研究的夙愿才得以实现成真。

著者

2006 年 7 月于上海交通大学

目 录

第 1 篇 总论

第 1 章 地下含水层储能技术的起源、发展和现状	3
1.1 发展含水层储能技术的背景	3
1.2 含水层储能在中国的起源和发展	4
1.3 美国及欧洲的发展	4
参考文献	5

第 2 篇 地下含水层储能原理及其运行系统

第 2 章 地下含水层储能的原理和应用	9
2.1 含水层储能的原理	9
2.2 含水层储能的基本条件	9
2.3 井式含水层储能系统	10
第 3 章 含水层储能与空调热泵的联合应用	14
3.1 热泵技术	14
3.2 热泵的分类	14
3.3 地源热泵	15
3.4 含水层储能与地下水源热泵	15
第 4 章 地源热泵的应用和发展	16
4.1 地源热泵的发展前景	16
4.2 地源热泵的运转系统	16
4.3 地源热泵的运行经济性	16
4.4 目前的应用和面临的关键技术	16
参考文献	17

第 3 篇 地下水的特征、流动和传热

第 5 章 地下水的形成	21
5.1 地下水的形成条件	21

5.2 地下水的类型	23
第6章 地下水渗流运动	25
6.1 地下水运动特征和渗流基本定律	25
6.2 渗流的基本微分方程和数学模型	26
6.3 含水层中地下水的稳定渗流	28
6.4 地下水取水构筑物的稳定渗流	30
第7章 地下含水层的流动和换热耦合作用	36
7.1 地下承压含水层中的换热	36
7.2 储能地下含水层流动传热的耦合模型和数值分析	38
7.3 结果的分析	46
参考文献	46
 第4篇 地下水运动和地下含水层储能的数值模拟	
第8章 地下水运动的数值计算	51
8.1 承压水运动的数学模型	51
8.2 规则网格有限差分法的基本原理	52
8.3 不规则网格有限差分法	53
第9章 含水层中热量运移的数学模型和数值方法	57
9.1 多孔介质中的导热过程	57
9.2 多孔介质中的对流换热过程	59
9.3 热量运移模型在含水层储能中的应用	61
第10章 地下含水层储能两阶段流动换热模型分析	65
10.1 储能的两阶段模型	65
10.2 控制容积法的求解	67
10.3 地下含水层储能流动换热特点分析	72
10.4 结果分析	75
参考文献	76
 第5篇 含水层储能的实验研究	
第11章 含水层储能实验系统的设计和数据分析	79
11.1 实验系统的设计思路	79
11.2 实验装置	80

11.3 实验数据的采集与处理系统	85
11.4 实验过程和结果分析	88
参考文献	94

第 6 篇 方案比较和分析

第 12 章 地下储能方案介绍和换热特点比较分析	97
12.1 地坑式储能系统	97
12.2 插管式储能系统	99
12.3 地下含水层(承压含水层)储能系统	101
第 13 章 地下含水层同层储能的储能井布置方法	103
13.1 储能含水层和储能方式选择	103
13.2 影响半径的确定	104
13.3 储能井间相对位置的安排	104
13.4 主动控制	106
13.5 总结	107
第 14 章 含水层储能系统热力性能与技术经济性能分析	108
14.1 ATES 热泵系统的节能特性分析	108
14.2 节能特性分析原则与 ATES 热泵系统的节能分析	109
14.3 系统的技术经济性能分析	111
14.4 含水层储能总体方案的经济效果评价及结果分析	113
参考文献	115

第 7 篇 设计方法及优化

第 15 章 含水层储能系统工程设计方法及其优化	119
15.1 ATES 系统的设计要点	119
15.2 闭式环路系统设计	120
15.3 含水层储能系统优化设计方法	124
第 16 章 含水层储能系统井距的分析和优化	127
16.1 含水层储能系统井距分析数学模型的建立	127
16.2 含水层储能系统井间距的模拟与分析	131
16.3 含水层储能系统井影响半径的确定	137
16.4 含水层储能系统影响半径的优化和控制	139

第 17 章 含水层储能井的数目、布局分析和优化 140

17.1 含水层储能井的优化模型 140

17.2 含水层储能双井注水保温系统实例分析 143

17.3 含水层储能单井系统和双井系统方案的分析 144

17.4 含水层储能井数目的优化和控制 145

17.5 含水层储能井群系统布局的优化和控制 147

第 18 章 含水层储能系统参数的综合分析和优化 151

18.1 最优化含水层储能模型的基本原理 151

18.2 对最优化含水层储能系统的基本要求 152

18.3 建立最优化数学模型的基本思路 152

18.4 最优化方法的数学模型 153

18.5 合理实用的含水层储能系统单目标模型的建立和优化 156

18.6 含水层储能系统多目标模型的建立和优化 160

参考文献 163

附录：水文地质篇

第 8 篇 上海地区的水文地质和地面沉降

第 19 章 上海地区水文地质及地面沉降 167

19.1 上海地区地面沉降发展的过程 167

19.2 地面沉降产生的机理 168

19.3 自然地理概况 169

19.4 地质概况 170

19.5 上海地面沉降研究的现状与展望 173

参考文献 174

第 9 篇 地面沉降

第 20 章 地面沉降数值模拟 179

20.1 地面沉降机理分析 179

20.2 储能过程温度变化对渗透系数的影响 181

20.3 地面沉降数学模型 183

20.4 数值求解 190

第 21 章 地面沉降计算结果和分析 194

21.1 数值模拟的主要内容 194

21.2 模拟计算的结果·····	195
21.3 利用含水层储能控制地面沉降的措施·····	197
参考文献·····	197

第 10 篇 水文地质条件与含水层储能

第 22 章 含水层水文地质条件对储能过程的作用分析 ·····	201
22.1 水流条件对储能过程的作用分析·····	201
22.2 水质条件对储能过程的作用分析·····	202
22.3 地质条件对储能过程的作用分析·····	204
22.4 外部条件对储能过程的作用分析·····	207
22.5 储能含水层的水文、地质和水质要求 ·····	210
第 23 章 含水层储能对水文地质环境影响的研究 ·····	212
23.1 回灌水水质与原地下水水质比较·····	212
23.2 储能过程中地下含水层水质的弥散分析·····	212
23.3 储能过程对水质的影响分析·····	212
第 24 章 储能对地下热平衡的影响 ·····	213
24.1 多孔介质热量传递方式·····	213
24.2 储能含水层中传热模型·····	214
24.3 结果分析·····	216
第 25 章 ATEs 系统的环境影响评估 ·····	218
25.1 环境影响评估·····	218
25.2 ATEs 对生态系统的影响·····	219
25.3 对环境影响进行评估的模型·····	222
25.4 ATEs 系统运行中对环境的效用·····	224
25.5 评估过程·····	226
参考文献·····	227

第 1 篇

总论

第 1 章 地下含水层储能技术的 起源、发展和现状

世界经济的现代化,得益于化石能源与核裂变能的广泛投入和应用。节能是当今科学技术急需解决的重点课题之一。地下含水层储能技术是一项顺应社会前进潮流、符合可持续发展要求的节能环保新技术。

1.1 发展含水层储能技术的背景

经济的发展,社会生活水平的提高,使公共建筑和住宅的供热和制冷成为普遍的需求。发达国家中,供热和制冷的能耗几乎占到社会总电耗的 25%~30%。寒冷地区的大型建筑直接燃烧矿物燃料产生热量,通过若干传热环节最终为建筑供热。燃烧矿物燃料产生 1500~1800℃的高品位热能,最终转变为建筑供热需要的 20~25℃的热能。显然,为建筑供热而燃烧矿物燃料意味着可用能的损失。利用燃烧燃料产生高温热能发电,再驱动热泵从周围环境中吸收低品位的热能,提高温度后向建筑供热的方式,是可以大幅度降低一次能源消耗的,但能源消耗依然惊人,矿物燃料燃烧产生的大量污染物,污染了环境。

现在普遍应用的空气源热泵,以空气为热源。空气源热泵结构简单,初投资低。缺点是在夏季高温和冬季寒冷天气时,热泵效率降低,其制热或制冷量随室外空气温度的变化,与建筑热负荷需求的趋势恰好相反。因此,有时要用电或其他辅助热源对空气进行加热。此外,供热工况下蒸发器的定期除霜,也消耗大量的能量。在寒冷地区和高湿度地区、在夏季的高温地区,热泵系统的工作效果都不理想。夏天空调耗费大量的能量,把更多的热量排放到空气中,加剧了“热岛”效应。

利用地下承压含水层良好的保温性,夏天将热量储存在地下含水层中,以备冬天取暖用;冬天将冷量储存起来,以备夏天制冷用,可以解决以上问题。这种空调系统,就是结合地下含水层储能的水源热泵空调系统。它可以把储能和太阳能及大气冷量的利用,完美结合起来,实现全方位的节能利用模式。

含水层储能是利用地下岩层的孔隙、裂隙、溶洞等储水构造以及地下水在含水层中的流速慢和水温变化小的特点,用管井回灌的方法,冬季将冷水或夏季将热水灌入含水层里储存起来。由于灌入含水层的冷水或热水的水头差,推挤了原来的地下水而储存在井周围含水层里。随着灌入水量的增加,灌入的冷水或热水不断向四周运移,从而形成了“地下冷水库”或“地下热水库”,需要时再抽取使用。这种利用地下含水层储存冷水或热水的技术方法称为地下含水层储能 ATES(Aquifer Thermal Energy Storage)。

这种技术利用大自然赐予的巨大热能、冷能和地层良好的保温性能,实行夏热冬用,冬冷夏用,解决了能源与负荷之间的不协调,实现了余量蓄存、高峰调节,进一步提高了能源利用率。采用含水层储能技术,我们所生活的地面下,就是一个庞大的天然地下冷水库和热水库。就上海市区而言,采用这种空调方式,每夏就能获得几千亿千焦冷量,替代的冷冻设备容量达

数万千瓦。冬季抽出的温水,利用其热量也可大量节省采暖用煤。

冬灌冷水和夏灌温水可以满足空调所需的低位能源。深井设备简单,启闭方便,是廉价而理想的空调系统。

1.2 含水层储能在中国的起源和发展

早在 1960 年左右,因为电力价格昂贵,上海地区的纺织业就把地下水抽取上来,直接在生产中利用其冷量,取得很好的经济效益。这可以看作是最早的地下含水层能量利用。

长期抽取地下水、长期不回灌的使用方式,导致了地面沉降。1921 年,上海地区首次发现了地面沉降现象。随后的观测发现,在 1921~1965 年,上海市区平均下降了 1.65m,最大下降量达到 2.63m,现在,最严重的地区,如杨浦区 and 虹口区的交界处,沉降量都超过了 2m 以上。地面沉降导致了一系列严重后果,主要体现在:

- ① 暴雨时,积水严重,无法自排;
- ② 桥墩下降,桥梁跨度降低,船只通行困难;
- ③ 码头溺水;
- ④ 建筑物下陷,墙体出现裂缝;
- ⑤ 地下管道甚至煤气管道破裂。

目前,地面沉降还对上海的地铁系统构成威胁。

早在 20 世纪 60 年代,上海为了控制工业过度抽取地下水所引起的地面沉降,同时为解决纺织厂夏季空调冷源问题,在实践中首创了人工地下含水层储能技术。这一阶段主要是利用地下承压含水层储存冷量。到 1966 年左右,又有人提出了地下含水层中储热水的方案。随后逐渐发展出储冷的“冬灌夏用”和储热的“夏灌冬用”的地下含水层储能概念,这一发明由中国学者孙永福等归纳总结而为世人所知。

此技术形成后,首先在纺织工业大规模使用。到了 80 年代初,我国已有储冷井大约 500 口,冬灌量 $30 \times 10^6 \text{ m}^3$,储热井 150 口,夏灌量 $5.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,取得了可观的经济效益,节约了大量能源。同时,为了控制地面沉降,坚持采用回灌量大于抽取量的原则。其结果不光有效控制了地面沉降,还在一定程度上使局部区域地面小幅上升,取得良好的经济效益和社会效益。

但是,出于对回灌水污染地下含水层的担心,国家对回灌水的品质要求越来越高,回灌的成本也逐步上升;城市环境保护的需要和发展模式的改变,纺织厂大量迁移郊区,数目众多的回灌井被封;电力价格的相对低下,上述几种原因的综合影响,使含水层储能这一起源于中国的技术逐渐被人遗忘。现在,中国在该领域的技术反而落后于美国和西欧。

1.3 美国及欧洲的发展

国外针对含水层蓄能的研究始于 20 世纪 70 年代早期,做了系统的理论研究。Kazmann 曾对含水层的各种用途作过描述。其在谈及热泵时指出(1971):“在热泵循环基础上利用含水层进行储热,将充分利用低品位的废热而显著提高热力效率。”Meyer 和 Todd(1973)说:“在电厂,储热井也许就是利用废弃高位热能的关键设备。”几年后,Kley & Nieskens(1975)、Delisle(1977)以及 Werner & Kley(1977)都相继发表了有关含水层储能的文章,从而开始了欧洲在

ATES(Aquifer Thermal Energy Storage)领域的理论研究工作。

1974年,在瑞士,有人做了一个灌热水于含水层的小试验。第一个长期野外试验是在美国的 Auburn 大学实施并完成的,试验共做了两组,分别于1976年和1978~1979年完成。1979年,在瑞典举行的国际学术会议上,第一次着重讨论了地热利用和有关地下储热的论文。

国外许多研究小组自1976年以来的研究工作,导致了1978年5月在美国 LBL 召开了第一届 ATES 国际专题讨论会。这次会议回顾了美国的5个项目和欧洲、日本的其他7个项目的状况。与会者同意在美国能源部支持下,在 LBL 定期出版国际 ATES 通讯。这一通讯概括了世界上各种 ATES 项目的当前状况和结果,并分发给13个国家的科学家和工程师。1978年后,在国际能源署 IEA(International Energy Agency)的赞助下,还制订了大规模储能的研究与发展计划协议。1980年,第一本关于 ATES 的专著在美国出版。

20世纪80年代,人们对 ATES 的兴趣大增,新建了一批利用太阳能、余热并结合热泵的示范工程。其中,1981~1983年是地下水储能发展的一个重要阶段。也就是在这段时期,全球出现了一批示范工程。1988年第一篇有关季度性热能储存的文章发表,并翻译成了其他语言。80年代后期,有关房间冷却的储冷也成为研究任务的一项。自1990年以来,在加拿大、瑞典等国相继建成配备储冷系统的工厂。国际 ICTES 会议自70年代后期以来每隔三年举行一次,主要讨论地下水储能的研究成果和实践经验。

从国外后期建成的地下含水层储能项目来看,该项技术的最大优点是节能。采用天然的冷量或热量,显著减少了系统的电耗。地下含水层储能的空调系统的 COP 值高达6~8,而常规的空调系统的 COP 值最高只能达到4。与采用地下水直接冷却相比,采用这种系统使地下水资源得到了保护,控制了地面沉降。此外,其所占的地面空间小,维护费用低。地下含水层蓄能成为一项很有潜力的技术。

21世纪,随着人类对可持续发展的进一步认识,对地球环境保护意识的进一步加强,ATES 必将沿着已经开拓的道路前进。当前开展的国际合作研究,极大地推动了设计工具(包括硬件和相关的计算机应用软件)的发展,包括利用自然的和利用人工储能装置、进行长期或短期热能储存及回收的范畴。国际能源署不同类型研发计划的实施,也积累了大量有关储冷、储热的工程经验和理论知识。一些简单或复杂的数学分析模型也得到了进一步的发展。日益完善的数学分析模型正用于对 ATES 系统的观察、分析、设计和优化。

ATES 至今经历了短短30几年的发展,在数学建模、工程实践以及经济、环境效益等方面能达到今天的水准,是难能可贵的。

参考文献

- [1] 陈铁成,夏鑫. 新型节能环保采暖(制冷)技术——水源热泵[J]. 节能与环保,2001,(6):47~48.
- [2] 曲云霞,张林华,方肇洪. 地下水源热泵及其设计方法[J]. 可再生能源,2002,(6):11~14.
- [3] 刘德成,高建岭,王晓纯. 水源热泵节能原理与系统设计[J]. 北方工业大学学报,2003,15(1):59~63.
- [4] Rosen MA. In: Proceedings of the Trabzon International Energy and Environment Symposium[J]. Trabzon(Turkey), 1996: 315~23.
- [5] 吴增非,等译. 当前含水层蓄热项目的回顾[J]. 清华大学热能工程系,1980.
- [6] Rosen MA, Pedinelli N, Hooper FC. In: Proceedings of the 6th International Conference on Thermal

- Energy Storage[J]. Espoo(Finland), 1994; 807~14.
- [7] Hoyer MC, Walton M, Kanivetsky R, Holm TR. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling[J]. Toronto(Canada), 1985; 75~9.
- [8] Meyer, C. F and D. K. Todd, Conserving Energy With Heat Storage Wells[J]. Environmental Science and Technology, 1973; 512~516.
- [9] Thore Berntsson, Heat sources——technology, economy and environment[J]. International Journal of refrigeration 25(2002): 428~438.
- [10] 葛永乐. 实用节能技术[M]. 上海:上海科学技术出版社.
- [11] 彦启森. 地下水源热泵[M]. 2001 年全国热泵和空调技术交流会论文集, 2001; 1~4.
- [12] B. Sanner, New trends and Technology for underground Thermal Energy Storage[J]. Institute of Applied Geosciences, Justus-Liebig-University, Deezstrasse 15, D-35390 Giessen, Germany.
- [13] Hans Buitenhuis, System Concepts with Aquifer Thermal Energy Storage[J]. DWA Energy and installation consultancy, The Netherlands.