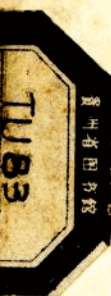


《方向性预测性情报的综合分析研究》

第 07 号

1981年度研究成果

供热及空调系统的蓄热



中国建筑科学研究院建筑情报研究所

负责单位及人员:

清华大学热能系 蔡启林

参加单位及人员:

北京师范大学物理系 李申生 徐河

前 言

节约能源是当前世界各国普遍关心的问题,供热及空调所消耗的能量在各国的总能耗中都占有不小的比例。例如,美国仅空调耗能就占总能耗的1/4左右,瑞典用于供暖的能量约为总能耗的一半。我国在供热及空调方面的耗能量虽不及发达国家所占的比例那样大,但也占有相当大的数量和百分率;并且随着国民经济的发展、人民生活水平的提高,正在不断地增长。为了节能,最近二十年来,国内外都在努力研究和试验把太阳能、工业余热或废热以及周围环境的自然能等廉价能源用于供热和空调。于是,如何使供热及空调系统能最大限度地提高一次能源的利用率以及经济、可靠地使用替代能源,就是当代科学技术所要解决的一个重点课题。供热及空调系统的蓄热是解决这一课题的关键之一,早在本世纪三十年代就引起一些科学技术工作者的兴趣和注意。但当时由于石油充裕,价格低廉,节能问题不受重视,蓄热技术未能得到普遍地应用和发展。自从七十年代初期石油危机以来,由于石油短缺,价格上涨,迫使世界各国,特别是石油进口国家重视节能问题和寻找替代能源的途径。在这种情况下,蓄热技术“应运而生”、获得了新的发展。

为了推动我国在供热及空调系统的蓄热技术的应用和发展,本文将介绍蓄热的作用、蓄热技术及其发展、并就我国在这方面的发展提出一些看法。

目 录

(综合报告)

一、蓄热的作用及其分类	(2)
(一)一般供热及空调系统存在的问题	(2)
(二)蓄热装置在系统中的作用	(3)
(三)蓄热的分类	(4)
二、显热蓄热	(5)
(一)概述	(5)
(二)以水为蓄热介质的蓄热装置	(5)
(三)地下含水层蓄热	(10)
(四)以岩石为蓄热介质的蓄热装置	(15)
(五)地下土壤蓄热	(17)
(六)讨论	(21)
三、潜热蓄热	(22)
(一)概述	(22)
(二)水(冰)蓄热(冷)	(24)
(三)水合盐类蓄热	(25)
(四)有机盐类蓄热	(28)
(五)饱和水溶液蓄热	(29)
(六)直接接触法蓄热	(30)
(七)结语	(31)
四、热化学蓄热	(32)
(一)概述	(32)
(二)热化学蓄热的理论基础与实例	(33)
(三)选择反应的标准及可能的待选反应	(35)
(四)热化学蓄热系统的技术经济分析	(37)
五、用于太阳能供热及空调系统的蓄热	(38)
(一)概述	(38)
(二)一些典型太阳能供热及空调系统中的蓄热装置	(38)
(三)太阳能供热及空调系统中蓄热装置的技术经济分析	(40)
(四)几点看法	(42)
六、关于我国研究和发展供热及空调系统的蓄热的看法	(42)
七、主要参考文献	(44)

综合报告

供热及空调系统的蓄热

一、蓄热的作用及其分类

(一) 一般供热及空调系统存在的问题

在阐述蓄热在供热及空调系统中的作用之前, 让我们先分析一下供热及空调热负荷的特点及其给一般供热及空调系统所带来的问题。

供热及空调热负荷具有两个明显的特点:

1、要求温度不高。一般多在 100°C 以下, 即使是吸收式制冷, 最高温度也不超过 200°C ;

2、热负荷是不稳定变化的。供暖和空调的热负荷具有季节性, 冬天供暖, 夏天空调; 并且都随着室外气象条件的变化而变化。生活热水及工艺过程的热负荷虽然是长年性的, 但每天的各个小时的热负荷也是变化的。

关于第一个特点, 因为它要求的热品位不高, 故为直接利用太阳能、工业余热或废热、电厂乏汽和周围环境的自然能等廉价的或可再生的能源创造了条件。从“按质供热”的观点看, 是十分合理和适宜的, 对提高燃料利用率和节省化石燃料都具有重大意义。

至于第二个特点, 因为热负荷不稳定变化的能量消费方式与太阳能、工业余热或废热、甚至锅炉、冷冻机设备等的能量生产方式之间都存在着很大的不同, 这就给经济、有效和可靠地利用各种能源带来了困难。下面仅举几例加以说明:

1、太阳能(包括周围环境的空气等的能量也是来自太阳能)是一个巨大的能源, 利用它, 不但可以节省大量化石燃料而且不会产生任何污染、是一种理想的洁净能源。但是, 太阳辐射能有季节、昼夜的规律变化, 同时还受阴晴云雨等随机因素的强烈影响, 故其来源具有很大的不稳定性。例如图1—1所示, 在冬季热负荷最大(冷负荷最小)时, 室外温度低, 太阳辐射强度小; 而在夏季热负荷最小(冷负荷最大)时, 室外温度高, 太阳辐射强度大。就冬季的一天而言, 白天有太阳辐射时, 室内不需供热或只要求少量供热, 而夜晚和阴雨天没有太阳辐射时, 室内正需要供热或要求大量供热。这个矛盾的存在, 使太阳能不能经济和有效地直接应用于供热及空调系统, 而必须另外配备一套辅助热源来保证其可靠性。

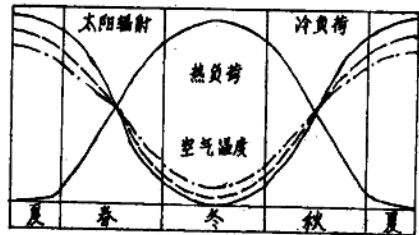


图1—1 冷、热负荷与空气温度和太阳辐射的比较(定性的)

2、热电合产供热是对燃料进行综合利用, 按热能的品位高低, 先发电后供热, 使燃料利用率达80%以上, 比一般冷凝发电的燃料利用率提高近50%。这是一种有效利用能源的方式。分析表明, 局部锅炉房、区域锅炉房和热电合产的煤耗之比约为3:2:1,

因此，热电合产供热是城市热化的发展方向。但是城市热电厂目前存在两个问题：

①在非供暖季节往往热负荷很小，供热机组或者停机或者以冷凝方式运行，这就会造成机组利用率低或者使汽轮机偏离设计工况以致内效率下降约6%，因而要多耗费燃料。如果非供暖季节较长，所多耗的燃料有可能抵销在供暖季节所节省的燃料。

②由于供暖热负荷不稳定，最大热负荷的时间非常短暂，通常为了保证供热机组经常在高效率下运行，往往要设置尖峰供热锅炉，这会增加初投资、增大运行费用和提高电、热成本。

这正是我国近几年来对是否应该在城市发展热电厂供热的争论焦点，也是使热电厂的发展缓慢的一个原因。

3、锅炉和冷冻机是传统使用的热、冷源。它们的容量一般总是大于设计条件下的最大热（冷）负荷，以保证满足在“最不利情况”下的要求。但是在使用季节里，只有极少的时间出现这种最不利情况，致使设备在绝大多数的时间进行开/关循环或低负荷下运行，造成实际运行效率（锅炉的热效率、冷冻机的性能系数）下降。特别是在最大热（冷）负荷和平均热（冷）负荷悬殊较大的场合更为突出。图1—2是油炉的运行效率和运行时间的关系曲线。该炉在稳态（在额定负荷时连续运行）下运行效率为73%，而只运行10%时间的实际效率则下降至43%，说明在整个季节里的平均运行效率低于设计工况的效率，就锅炉来说，一般只能在40~70%

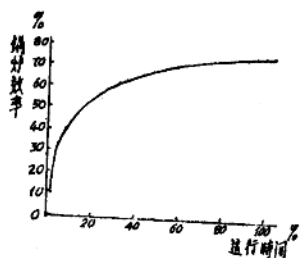


图1—2 锅炉效率和运行时间的关系曲线

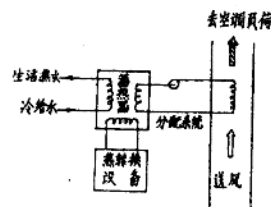
的范围内。

（二）蓄热装置在系统中的作用

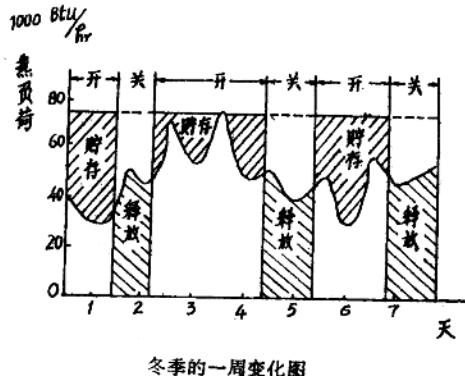
图1—3是蓄热式供热及空调系统的基本结构示意图，热源侧包括冷冻机、锅炉、热泵、太阳集热器、热转换设备等热源机器；热负荷侧包括空调机、散热器、吸收式制冷机等用热设备；而蓄热器则一般由蓄热介质和容器所组成。热源机器生产的热量由热源侧的载热体（通常称为一次载热体或一次流体）传给蓄热器；用热设备所需的热量则由热负荷侧的载热体（通常称为二次载热体或二次流体）从蓄热器中提取。在运行过程中，当热源的热量高于热负荷时，蓄热器被充热并贮存热量。当热源的热量低于热负荷时，蓄热器被提热，因而释放热量。图1—4和图1—5是带蓄热的锅炉用于空调的方



图1—3 蓄热系统的基本结构示意图



1—4 蓄热器/热转换设备串联方案



炉子75000Btu/hr 蓄热器容量1,000,000Btu

图1—5 蓄热器—热转换设备运行方法

案和运行方法的图式。从该图式可以看出，蓄热装置好似一个中间转换“仓库”，使热源机器的运行和热负荷曲线无关，也就是说，蓄热装置起着调节平衡的作用。因此，蓄热系统至少具有如下优点：

1、蓄热使太阳能、工业余热和废热以及周围环境的自然能等再生能源和廉价的（甚至包括原来应该是废弃的）能源得到有效和可靠的利用，从而可以大大节省化石燃料。

2、蓄热装置贮存低峰负荷时的热能，并提供给高峰负荷时使用，使热源机器能经常在高效率下运行，既提高了使用季节的平均效率，又可减小设备的容量。

3、由于设备容量减小，故减少了设备费和材料费（因而材料耗能量也相应减少）。

当然，蓄热也带来了一些缺点，例如：

1、由于增加了蓄热装置，因而增加了系统的复杂性和装置本身的费用；

2、会增加输送传热介质的动力消耗。

（三）蓄热的分类

蓄热一般可根据下面几种情况进行分类：

1、按蓄热时间分：

（1）短期蓄热：以天或周为时间周期的蓄热。目的是为了调整一天（几天）或一周的热生产和热消耗之间的不平衡。例如在冬季的太阳能供暖，集热器在白天运行时所吸收的太阳辐射能除满足白天建筑物的热耗外，同时还应把一部分热能贮存起来，留待夜间或云雨无太阳时使用，以减小辅助热源的容量。又如，冷冻机利用非高峰负荷的和夜间廉价的电力（国外夜间电力是廉价的）制冷并贮存起来，留待次日白天空调时使用，以减小设备的容量并获得经济利益。

（2）长期蓄热：以月或季节为时间周期的蓄热，目的是为了调整一个月（几周）或季节的热生产和热消耗之间的不平衡。例

如，太阳能供暖只有通过长期季节性蓄热，才能把太阳辐射强度高的夏季和春季的太阳热能收集、贮存到冬季使用，才能做到大大减少或甚至取消辅助热源。又如，冬季室外冷空气的冷量也只有通过长期季节性蓄冷才能应用于夏季空调。

2、按蓄热温度分：就供热及空调系统的使用范围而言，可分为：

（1）高温蓄热：蓄热介质温度高于 100°C ；

（2）低温蓄热：蓄热介质温度低于 100°C ；

（3）蓄冷：用于空调系统的冷量贮存，最低温度可达 0°C 。

3、按蓄热原理分：

（1）显热蓄热：利用蓄热介质（材料）升温吸热，降温放热的原理进行蓄热。因此，要求材料的比热高、密度大。可作为显热蓄热的固体和液体材料很多，例如：砂、石、砖、混凝土、铁、水、石油、溶盐等等。

（2）潜热蓄热：利用蓄热介质（材料）从固体转化为液体或液体转化为气体的相变过程吸热，而在相反过程放热的原理进行蓄热。由于液体—气体的相变过程伴随着很大的体积变化，尽管它具有最大的潜热，实际上是不实用的。因此，各国在研究潜热蓄热时主要是研究固体—液体的相变蓄热。潜热蓄热材料应具有熔解潜热大，热稳定性好，导热性好，不易燃、不腐蚀、无毒等特性。目前认为比较适宜的材料有冰，带结晶水的无机盐类和石蜡等。

（3）化学反应蓄热：利用某些物质在可逆化学反应中吸热和放热来进行蓄热和提取热量。例如： $\text{N}_2\text{O}_4 = 2\text{NO}_2 = \text{NO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ （ $0-90^{\circ}\text{C}$ ）

（4）混合蓄热：蓄热方法的组合可以改善特性、降低费用。例如，将熔解潜热和大温度范围的显热组合利用，可提高能量密

度，在显热流体中使用低费的固体填充床可以形成斜温层。因此，混合蓄热原理有：显热—潜热组合蓄热和固体—液体组合蓄热。

二、显热蓄热

(一) 概述

利用材料的显热来蓄热，这个原理早在上一世纪就在工业上应用了。但以节能为目的的大规模应用的研究，却只有近十几年的历史。在蓄热材料方面，从比热高、密度大、价格低廉、来源容易，对容器无腐蚀性、渗漏时不造成危险和有良好热稳定性等原则要求出发，经过研究、比较和筛选，在现阶段一致认为：在供热和空调系统所适用的温度参数范围内，在液体材料中以水、在固体材料中以砂、石等最为合适。这些材料热容量大，且都非常便宜。因此，蓄热装置的费用主要取决于容器保温及蓄热系统有关设备和动力的费用。过去一般使用木材、混凝土、金属（钢或铸铁）等材料制作容器，外表面要有良好的保温。对于大规模和长期蓄热来说，它们将是昂贵的。因此，近几年来地下蓄热的实验和研究受到很大的注意，并且取得了可喜的成果。

下面将分别介绍国内外在利用水、岩石、地下含水层和土壤蓄热方面的原理、特性和技术发展动向。

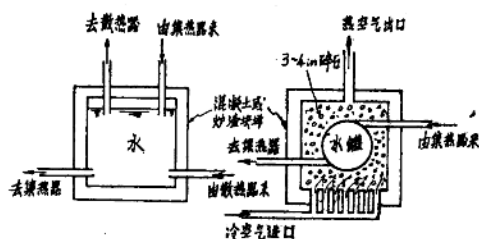
(二) 以水为蓄热介质的蓄热装置

水的热容在所有显热蓄热材料中是最大的，是一种很好的蓄热材料。在太阳能供热及空调系统和冷冻机制冷的空调系统中，已广泛利用蓄热水箱（槽或池）作短期蓄热或蓄冷，随着长期季节性蓄热的需要和发展，出现了地下大型蓄热水库，甚至利用湖、河、海来蓄热的方法。丹麦为了节能，要求热电厂在系统中采用包括天和季节性的热水蓄热，并已计划建造容量约一百万 M^3 的热水池的示范工程。日本空气调节卫生工学学会空调设备标准委员会编印的《空调设备省能

技术指南》中，已载入蓄热可以省能的场合，并提出确定蓄热槽结构的标准。瑞典国家动力委员会等机构在1981~1984年的蓄能建议中，就包括建设一个大型蓄热水库和利用湖、海床沉积进行蓄能的试验研究。

1、蓄热水箱

图2—1是两种典型的蓄热水箱。其中的(a)是水既作为蓄热介质也作为载热体；(b)是蓄热介质水兼作一次载热体，而以空气作为二次载热体。通常以混凝土或钢为容器。如果蓄存高温水，则要考虑水箱的承压问题。



(a) 混凝土箱充满水 (b) 水箱周围有岩石

图2—1 蓄热水箱 (Dr Harry Thomason的系统)

容积相同的水箱，以球形的单位面积的体积最小、保温最便宜，但制作和安装却比较困难。故金属水箱往往制成直径和长度之比接近于1的圆柱形；而为了施工方便，混凝土水箱则尽可能做成矩形。

利用水做蓄热介质时，由于顶部和底部存在着温差，会引起自然对流混合。因此，如果以水箱内水的混合特性来分类的话，可以分成如下三类蓄热水箱：

(1) 完全混合流：箱内水温处于均匀状态，混合特性 $M = 0$ 。

(2) 混合流：箱内水温分布不均匀，混合特性 $0 < M < \infty$ 。

(3) 压出流：箱内水温分层，水完全是“活塞”式流动。内部存在着两个水域，交界面清晰，在立式水箱中蓄存冷水时，使之从下往上流，蓄存热水时，使之从上往下流，便能获得温度分层。由此，也把这种方

式叫温度分层型, 混合特性 $M=\infty$ 。

各种流型的温度分布如图 2—2 所示。

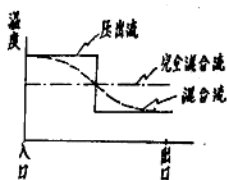


图 2—2 各种流型的温度分布

温度分层在瞬态响应过程中损失最小, 其蓄热效率最高。因此, 许多研究者都在研究层温蓄热的方法。例如用活动的或可拆卸的隔板使冷、热流体分开; 或使水箱上部的热流体之间保持较陡的斜温层。

影响温度分布的动态特性的因素很多, 主要有:

(1) 箱内流体的混合状况, 如蓄热水箱内的水流有形成非完全“活塞式”流的情况, 就会使蓄热量不能百分之百地充分利用(相反的情况, 蓄热也不能充分)。

(2) 箱内的结构与循环水量: 这主要是指箱内隔墙的配置与数量, 连通管的直径与数量以及位置等设置情况, 还有箱的容积和循环水量。

(3) 失热和得热: 由于水箱本身存在围护结构表面, 使蓄热水箱不可避免地会有失热或得热。从这点出发, 对于为削平瞬时高峰而设置的短期蓄热热水箱来说, 如果埋于地下又做保温, 反而不利于动态特性, 原因是土壤具有热容量。

(4) 蓄热温度与提取温度: 这里, 蓄热温度是指蓄热终了时箱内水的平均温度, 而提取温度是指从箱内提取出的水温。热量能否充分利用和运行时间长短与这两个温度的取法有关。

水箱内的水温分布对蓄热效率有重要的影响。要想通过箱内的温度分布来获得输出水温和输入水温之间的关系, 就必须应用三维的连续性方程、动量守恒方程和能量守恒

方程求解, 十分复杂。有一些研究者在假设水箱内的水是完全混合或者认为水温分布是线性的条件下来求解, 其所得的结果小, 往往和实际有出入。目前, 在设计中主要是应用瞬态响应法来求解输出水温的变化。

2、连续蓄热水槽

在日本, 空调系统的蓄热装置常利用建筑物地下空间充作连续蓄热水槽, 其目的是既可以蓄存制冷机的冷量, 也可以用于蓄存太阳能和其它低温剩余热量。按照各槽之间的连接方式可以分为: 连通管式、混合或搅拌式、潜水堰式、改良潜水堰式和温度分层式。表 2—1 列出基本原理图和其流动特征, 其中以改良潜水堰式和温度分层式较好, 但后者在控制和结构方面尚有难点, 而前者结构简单又好控制, 近似于压出流动, 是一种较好的方式。

图 2—3 是改良潜水堰式的蓄热过程图。图中(a)表示初始状态, 水槽中是低质水(原始状态的水)当送入高质水(入口的水, 即热水)时, 高质水的流动和浮力平衡(温度分层)、在槽内的平面方向形成层状扩散, 随着时间的推移, 按照层状向下以压出流动方式推进。在交界处是混合水, 如(b)所示。在移向第二槽时, 槽间有一个流动方向变成向上的狭缝。由于流动方向和浮力方向相同, 在流动方向上产生了热扩散现象。从而有一部混合水开始向第二槽流动, 接着高质水流进来, 在第二个槽上方形成了温度分层并扩展开, 如(c)和(d)所示。以后几个槽按相同的过程进行, 如(e)和(f)所示, 蓄冷过程和放热过程相同, 沿着相反的方向进行。

正如图中显示的那样, 在蓄热过程的循环中, 水槽下部有形成死水区的危险; 而在放热过程的循环中, 水槽上部有形成死水区的危险。所以下部开口和潜水堰的设计要十分注意。这种蓄热水槽在水深越深时效率就越高。

蓄热槽的各种型式

表 2—1

项 目	连通管方式	混合器或搅拌方式	潜水堰方式	改良潜水堰方式	温度分层方式
原 理 图	平面图				
	剖面图				
混合机理	几乎完全混合	完全混合	每隔一槽混合机理不同易产生死水区	近似于挤出流动良好	上下方向温度分层流动(挤出流动)
死 水 区	在角落处易生成	由于设置了混合器或搅拌器消除了死水区	每隔一槽产生	堰上部、下部连通口下部易产生死水区	几乎不产生
短 路	易 产 生	无 短 路	"	在排水管处易产生	无
槽内温度分布	容易造成不均匀	同 前	产生不均匀	同 前	垂直方向有温度分布
可 控 性	难 控 制	可 控 制	不可控制	良 好	难 控 制
连通处流速	为加速混合流动要快	不 管	不 管	慢些较好	上下方向流速小
水 深	浅些较好	不 管	不 管	深些较好	深些较好
构 筑	利用基础的二层平板空间	同 前	同 前	同 前	别种途径结构(利用广场等的地下)
其 它	在角落的槽上必须设置障碍板			必须堵塞排水口	容易用在消防用水等公共设施上

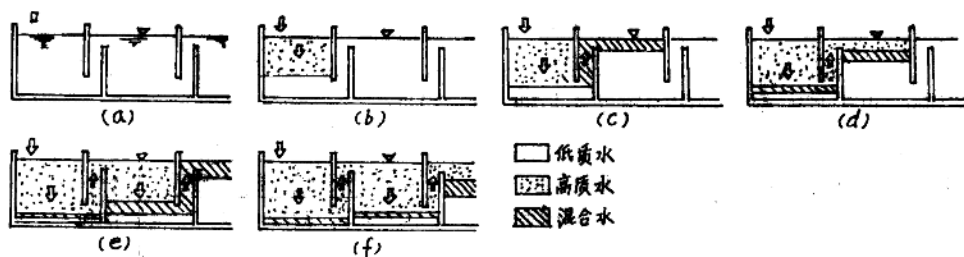


图 2—8 改良潜水堰式蓄热水槽的蓄热过程

我国1974年设计的上海体育馆就是采用改良潜水堰式的蓄热水槽蓄冷。该体育馆夏季最大汽负荷为450万kcal/h, 用了一个1200T容量的蓄热水槽, 而冷冻机的总容量只选用了240万kcal/h。提前4小时运行蓄冷。几年来运行效果良好。

3、地下岩石洞穴的蓄热水库;

地下岩石洞穴的蓄热水库是以岩石洞穴作为容器, 水作为蓄热介质的蓄热装置。在有岩石的地区可能是大规模短期蓄热和长期蓄热的一种方法。

瑞典已在斯德哥尔摩西北约150公里的阿累斯达(Aresta)建造了一个15000M³

的供研究和实际运行用的岩石洞穴蓄热水库。洞穴顶部低于岩石地面25M、长45M、宽18M、高22M。蓄热温度范围为70~150℃, 以废物焚烧厂的热为热源, 通过一换热器与区域供热系统联结。蓄热时, 热水进入洞穴顶部, 而冷水由下部抽出。提热时, 流动方向相反。其正常运行原理图见图2—4。

该工程将于1982年春建成, 1984年完成试验工作, 之后即作为短期蓄热的正常运行。

在试验期间, 将模拟一年的太阳能供热的假想周期, 使前6个月蓄存的热用于后6个月。

该工程预计费用为400万美元, 估计每

年能节油400M³以上。

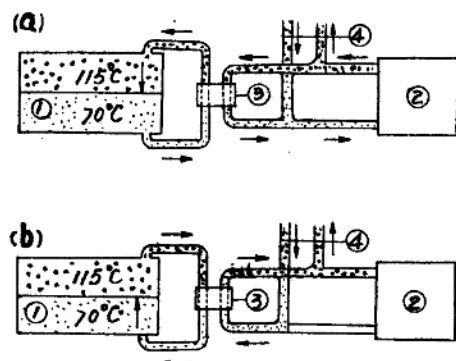


图 2-4 蓄热水库正常运行原理图

注：(a) 加热装置运行，蓄热水库蓄热

(b) 加热装置停止运行，蓄热水库供热

①岩石洞穴蓄热水库 ②加热装置 ③换热器

④区域供热网

瑞典国家动力委员会等机构不但在财政上给予支持，而且将组织对该蓄热装置进行全面的试验，其中包括热损失、岩石稳定性、水化学、换热器和结构材料、对环境的影响以及水的热分层等蓄热中的主要问题，以取得同类更大型的蓄热水库的短期和长期蓄热的设计数据。

4、利用水库、湖和海湾进行蓄热

利用水库、湖和海湾蓄热对于大规模蓄热是很有吸引力的，它既可以作为低温蓄热或蓄冷库，也可以使本身作为热源，与热泵结合回收自然能。这种蓄热方式在最近已引起许多国家的重视。

早在1976年5月在北大西洋公约组织科学委员会召开的蓄热会议上，以J.W.Hodgins为首的低温蓄热工作组在有关大规模蓄热的建议中，首先就要求完善地解决湖、池塘的构造和运行问题，并提出了迫切需要注意研究的问题：

(1) 在蓄热期间的对流和混合损失；

(2) 在蓄热时混合和提热时的分层过程；

(3) 贮存水的氧损失（即由于贮存会导致在冬季发生缺氧问题）；

(4) 在复盖层下面贮存水的完整，包括防止下雨时的稀释，地下水移动的干扰以及在湖面上风力的作用下对复盖层的干扰。

下面简单介绍挪威G.Grevskott所研究的两种蓄热方式：

(1) 浮动的浅池

多数地区的湖和海的表面在经过辐射、对流、传导和蒸发等热损失后，能达到的最高温度为25℃。用一种透明的塑料覆盖表面，用泡沫塑料或其它材料对水的顶层加以保温，表面将作为浮动浅池集热器运行。图2-5表示一种浮动集热器的设计，它是一个具有黑色底部和透明顶部的塑料包，用5cm厚的水层填充。塑料包和水之间用聚氨酯保温，木框架和木方以及包和透明顶之间用电镀螺栓固定。每个单元可总共容纳水量20m³（5300加仑）。

在黎明前把集热器充满冷水，在白天受太阳辐射加热，直至中午温度发生下降以前，就把热水放进水面下的蓄热器。

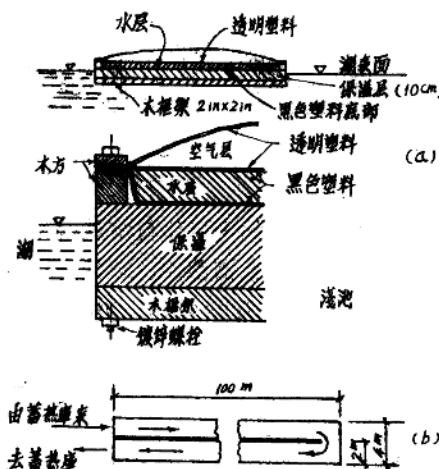


图 2-5

(a) 平板浅池集热器 (b) 具有木框架的单元集热器

这种方法不占用地面积，适用于附近有水表面的人口稠密区，可以把收集的热水输入一个区域供热系统，以便作为工业用水和冷却用水。

(2) 长期蓄热的蓄热器

在北欧,夏天日照大,而冬天需要大量供热时,日照却小,因此,扩大利用太阳能在很大程度上将取决于长期蓄热装置的发展。在水面下采用保温塑料“包”可以解决这个问题。

为了保持热损失和费用尽可能低,蓄热器应是球形的,并认为最合理的尺寸将在 1000m^3 (2.6×10^3 加仑)至 $1,000,000\text{m}^3$ (2.6×10^8 加仑)的范围内,水面下蓄热器的典型设想如图2-6所示。热水紧接着箱底,箱壁由塑料、保温层和为使保温层所受的浮力得到平衡而填充的砂子组成。要使箱壁能充分减少热损失,壁厚需达2m,蓄热器的形状还可以是立方体、锥体和圆柱体,通过试验还可发现其它较好的形状。

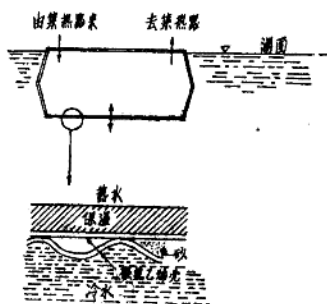


图2-6 保温的水下热水蓄热器

如果使用廉价的材料,并用厚为10cm、导热系数为 $0.3\text{kcal}/\text{m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 的聚氨酯保温,在忽略其它热阻的条件下,当经过壁的温差为 60°C 时,通过每 m^2 的热损失将是 $18\text{kcal}/\text{hr}$,而对于 $100,000\text{m}^3$ ($2. \times 10^7$ 加仑)的蓄热器来说,总热损失将是 $432,000\text{kcal}/\text{hr}$,温度降每天为 0.10°C ,这些数据说明蓄存2~3个月仍能回收多数的热能。

图2-7是用于输送的管状蓄热器,对于输送长达50海里的距离而言,这种蓄热器最合理的尺寸将在 $10,000\text{m}^3$ 至 $20,000\text{m}^3$ 的范围内,试验模型和原型的设计都在进行中。

水面下蓄热器也可用于蓄存来自核电厂和其它工厂的“废”能以及地热等。

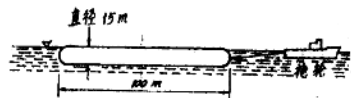


图2-7 由拖轮牵引的长圆柱形的热水蓄热器

5、太阳池

太阳池是利用具有一定盐浓度梯度的池水作为集热器和蓄热器的一种太阳能热利用系统。

早在本世纪初,Kalecsinky就在一些天然湖中观察到,具有一定盐浓度梯度的水能抑制自然对流,使湖底吸收的太阳辐射能导致底层水温显著升高的有趣现象。1948年Bloch曾向以色列国家研究委员会建议,用一个人工分层的盐水池作为太阳能集热器。十年后,首先由Tobor领导的以色列国家物理实验室来实现了这个人工太阳池的想法,至六十年代初,他们在死海海岸建立了一座 $25 \times 25\text{m}^2$ 的试验性太阳池,在80cm深处,水温达到 90°C 以上,同时进行了基于太阳池物理学的理论研究,并在实验室和现场,研究了各种影响太阳池特性的因素,这些广泛的开拓性工作,为太阳池的发展和应用奠定了基础。由于它简单、价廉、宜于大规模使用,故近年来日益引起世界各国重视。在不少国家中开展了对太阳池各方面的研究。当前,尽管还有许多机理有待探讨,但应用研究已经进入实用化阶段。在供暖和空调方面,也已得到了实际的应用,并且取得了较好的效果。

下面介绍两种实用性的太阳池:

(1) 简单太阳池

图2-8是简单太阳池结构图。池中充满具有一定浓度梯度的氯化钠或氯化镁溶液,池底通常涂黑,使达到池底的太阳辐射能全部被吸收。池深一般是一米多,其面积大小根据所需提取的热量而定,由几十平方米至若干平方公里不等。这是一种仅有非对

流层的太阳池；但事实上，这种太阳池也存在对流区域，例如，在池顶，由于风和蒸发的影响，会形成表面对流区；此外，由于从池底提取热量，也会形成底部对流区，底部对流区实际起到了蓄热的作用。

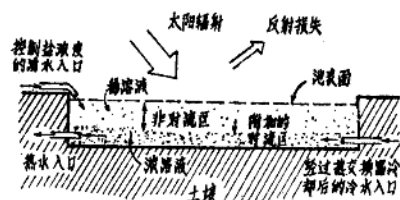


图2-8 简单太阳池构造

这种简单太阳池的优点是结构简单，但因为对流区很薄，一般只能实现数天的蓄热。

(2) 隔层太阳池

如果在简单太阳池的每一对流和非对流区域的分界处加一透明塑料隔层，则成隔层太阳池，如图2-9所示，加上部隔层可以防止表面蒸发和风的扰动，加下部隔层的目的是使底部非对流区域和对流区域分开，这样，一方面可以提高池的稳定性，有利于提取热量，另一方面又可以人为地增厚对流区域，使池的蓄热性能得到改善。因此，得到了广泛的应用。

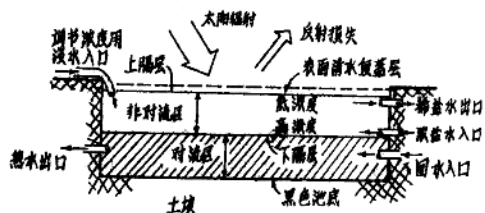


图2-9 隔层太阳池构造

这种隔层太阳池，由于对流区和非对流区是人为划分出来的，对流区可以作得很厚，因此，有可能实现长期蓄热。

太阳池的一些物理性质决定了它的运行工况。为了深入了解太阳池的运行机理，进而对池的运行参数作出估计并进行最优化选择，近年来，人们着重对池的光学性质、稳

定性条件以及温度场的分布进行了研究，在不同程度上作出一些简化假设，并已提出一些理想化的模型。

目前，太阳池设计研究的动向，大致包括四个方面：

(1) 在现有技术的基础上，利用各种抗热、抗盐、抗光的新型材料，研究各种施工方法，从而得到最经济、可靠的设计。

(2) 研究各种基于非对流原理的其它类型太阳池，如饱和溶液太阳池，胶状聚合物太阳池，依靠提高粘滞性抑制对流的太阳池等。

(3) 通过利用土壤和相变材料来提高太阳池的蓄热能力。

(4) 考虑太阳池的综合利用。例如，将隔层太阳池的隔层换用菲涅尔透镜聚光，在池底安置太阳能电池，这样，既能得到热能，又能得到电能，对于小型住宅，这是很适宜的。

(三) 地下含水层蓄热

地下含水层蓄热是近十年来才引起许多国家重视的一项节能措施。目前尚处在试验研究阶段，开发利用的规模虽然不大，但经过这几年的试验研究，普遍认为地下含水层是目前可供选用的季节性蓄热方案之一，其蓄热温度可达150~200℃，对空调蓄冷更有现实意义。据报导，美国多数地质学家和地下水文学家一致同意热水和冷水都能向含水层注入、储存和回收，并指出最新的研究和小规模的试验已说明能量回收率约为季节性蓄热的70%。因此，美国能源部预言：美国在2000年以前含水层的季节性蓄热每年将代替或节省石油高达三亿五千万桶。

在国际上，研究地下含水层蓄热的国家很多。1978年五月在美国能源部支持下建立了有美、法、德、日等13个国家参加的国际通讯联络组织，交换资料研究情况，并出版“ATESNEWSLETTER”（地下含水层蓄热通报），现已改为“STESNEWSL-

ETTER (季节性蓄热通报), 成员已发展到22国家, 在季节性蓄热研究中仍以地下含水层蓄热为重点, 其应用对象多为区域供热和区域供冷。

1、地下含水层蓄热系统

所谓地下含水层蓄热就是通过井孔将低于含水层原有温度的冷水、或高于含水层原有温度的热水灌入地下含水层、利用含水层作为蓄热介质来蓄存冷量或热量, 待需要时用水泵抽取使用, 目前实际应用的地下含水层蓄热系统主要有以下两种:

(1) 单井蓄热系统

图2—10是单井蓄热系统的一种, 用于蓄冷。在冬天, 把净化过的水经过自然冷却塔或机械冷却塔5进行冷却后, 用回灌送水泵7灌入深井中。到夏天, 再用深井泵1把蓄存在深井中的冷水抽出, 用于空调系统降温。利用一个井做回灌、储存和提出之用的, 称为单井蓄热系统。这种冬天回灌, 夏天使用的蓄热系统, 俗称“冬灌夏用”。

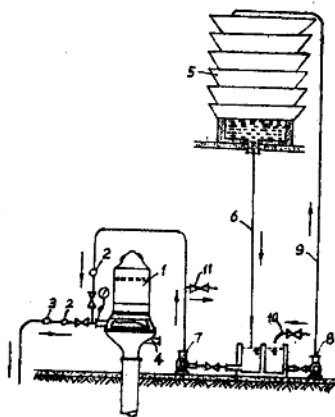


图2—10 淋水塔加压回灌

注: 1—深井泵 2—水表 3—逆止阀 4—测量孔 5—自然淋水塔 6—落水管 7—回灌送水泵 8—淋水塔喷水 9—送水管 10—自来水管 11—送其它井回灌管

当然, 也可以在夏天灌入热水, 蓄存至冬天使用, 俗称“夏灌冬用”。

单井蓄热系统结构简单, 但如果使用不

合理, 开采量太大, 就会造成地下水位下降, 使地面产生沉降。

(2) 井对蓄热系统

图2—11是用于供热系统蓄热的井对运行方案。它包括一对水泵井和一个换热器。在蓄热时, 温水井的水被抽出, 经换热器由供热系统的水加热后, 灌入热水井蓄存。在提热时, 热水井的水被抽出, 经换热器加热供热的水, 被冷却后灌入温水井, 如果用于供冷系统的蓄存, 则按相反的方向运行。

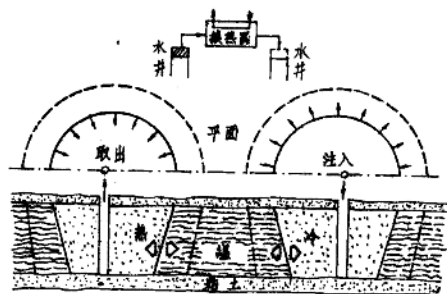


图2—11 井对蓄热运行的方案图

井对蓄热系统的优点是作为蓄热介质的水来回循环于同一含水层, 在回灌和提取时都不会引起地下水位变化, 热损失小于单井系统。

2、国外的开发计划和研究概况

(1) 开发计划概况

自七十年代开始, 国外很重视地下含水层蓄能的研究。

①1978年9月22日在国际能源委员会(IEA)指导委员会会议期间, 由比利时、丹麦、西德、瑞士、瑞典、欧洲共同体委员会和美国共同签署了一项蓄热节能研究和开发计划协议。其中一个附件就涉及大型含水层低温蓄热的方案研究和示范工程的建造, 以及发展使用数学模型模拟土壤热质传递。

②美国季节性蓄热开发计划由能源部蓄热系统局(PNL)负责, 目前主要进行三方面工作:

a、建立季节性蓄热资料室, 简编过去

和现有有关季节性蓄热的资料,以促进今后的工作。目前已收集约1200篇论文,重点是地下含水层蓄热文章。

b、建造示范性工程,计划到1985年在高温蓄热、低温蓄热、蓄冷和冷热水联合蓄存等四个技术领域,建成四项展示工程。经方案选择,至1980年4月已确定了三项目:即纽约州立大学校园蓄存用冷却塔将水冷却的蓄冷装置;阿拉斯加Bethel城蓄存Bethel公用柴油发动机动力厂余热的低温蓄热装置和明尼苏达大学利用发电厂作热源,回灌150℃的高温蓄热装置,目前都正在按计划进行。

c、提供技术支持,最初的活动主要是面向示范工程,包括社会、经济和环境的评估及技术可行性的研究,以便为示范计划提供完整的依据。已经进行的项目有:空调装置中进行地下水回灌的评定、地区含水层蓄热的可能性以及编制含水层蓄热系统方案设计和评价的指南。

③西德、法国、丹麦等国均制定了含水层蓄热的研究和发展计划,其中瑞典、比利时侧重于蓄存工业余热进行区域供热;丹麦在研究热电合产系统中蓄热的应用;西德目前有兴趣的是发展近地表面的含水层蓄热系统;而法国研究的目的在于解决太阳能的季节性蓄存,利用地下水热泵进行供热和空调的可能性,以及工业余热(主要是发电厂的余热)的回收。

(2) 理论研究概况

美国、瑞典、法国等许多国家几年来一直在进行含水层蓄热特性的理论和模拟研究,可归纳为两方面:

①与现场试验结合,利用数学模型对与含水层蓄热有关的参数(如水力传导率、含水层导热系数、含水层厚度、回灌量等)敏感性的研究以及一般性的研究。目的在于评价、预测给定地质条件和蓄存条件下的蓄存效率;选择表征含水层蓄存水力、热力过程的关键性无因次参数数据,以便简化蓄存效

率的计算和发展适用近似图表或半解析计算方法,研究合理的蓄存系统以及合理的运行制度。

因此,美国、日本、瑞典、西德、法国、丹麦等国都在建立自己的数学模型,研究分析问题的对象基本上是单井或井对系统,规模有限,初步得到现场试验验证的有美国劳伦斯伯克莱试验室发展的三“C”(传导、对流、压实),三维积分有限差分模型和日本山形大学发展的复数势函数有限差分模型。而瑞典皇家技术学院发展的“AQVLFEM”地下水有限元模型和法国地质采矿研究局(BRGM)等发展的数学模型,正在准备经受现场试验的检验。但是,在国外无论数学模型经受过实践检验与否,均在用于预测或方案分析研究。

②实验室试验研究,随着对含水层蓄热特性研究的深化,发现问题的关键是参数基本不确定,例如水力传导率与温度的关系,导热系数,水力扩散受密度差的影响,以及牵涉到非绝对流的物理学,如浮力流、垂向热前沿的稳定性等。美国、瑞典、丹麦等国正对有关方面进行研究。

8、我国地下含水层蓄能的由来和发展

我国随着国民经济建设的不断发展,工业城市地下水过量开采,造成地下水位逐年下降以及地面下沉,为了解决这个问题,自1958年夏季起,上海开始试验深井回灌,经过多年试验摸索,至1965年总结肯定了管井回灌有利于提高地下水位,控制地面沉降,并且可以改变地下水温和水质。此外,也逐渐掌握了回灌技术,特别是在真空回灌技术方面取得了一定经验,从而为我国利用地下含水层蓄能奠定了初步基础。

自1965年起,上海开始较大规模地进行“冬灌夏用”,蓄存冬季自然界的冷量,以供夏季空调所需;同时,也进行了一些“夏灌冬用”,以供纺织厂的调温,调湿之用。到目前为止,据不完全统计,已有上海、北

京、天津、南昌等15~18个城市正在试验或应用深井回灌，进行地下含水层蓄能-主要是蓄冷。表2—2列出了一些城市的回灌情况。

(1) 含水层贮能与水文地质条件

我国试验或应用深井回灌贮冷的各城市所处地理位置大体可分为三类，即：滨海三角洲平原、河谷平原（河流阶地）和山前平原。

①滨海三角洲平原：

我国沿海一些工业城市如上海、天津、杭州等地处滨海三角洲平原，其特点是含水层以细砂或中砂为主，而且地层平坦，地下水自然流动速度缓慢，蓄能条件好。

表2—2

城市	日期	冬灌总量 (万吨)	夏用总量 (万吨)	备 注
上海	1965~1979	10,540	7670	市区24个纺织厂
天津	1967~1978	1,630		其中纺织空调占76%
北京	1970~1979	600	560	第三棉纺厂
南昌	1974~1979	260	420	江西纺织印染厂

例如，上海某纺织厂冬季将自来水（取自黄浦江）送至冷却塔，再次冷却降温后灌入地下含水层。1977年11月至78年3月共回灌159,278吨。

其自来水温在 6.22°C 至 14.5°C 之间（90%以上的水温为 $6.22\sim 13.89^{\circ}\text{C}$ ）回灌温度在 1.8°C 至 9.33°C 。

1978年夏用期共开采157,364吨，水温为 7.9°C 至 12.2°C ，其中 $7.9^{\circ}\text{C}\sim 9.0^{\circ}\text{C}$ 的水占50%以上。

又如，上海虹桥国际机场，候机大楼（120米×30米×9米高）系大玻璃窗建筑，空调面积4000 m^2 ，自1974年起空调系统采用冬灌冷水，最热月保证室温为 $26\sim 28^{\circ}\text{C}$ ，回灌水取自深井，经通凤式冷却塔冷却降温后灌入地下；夏用水温逐年下降，1974年是 15°C ，至1978年已降为 10°C 。

又如，天津第三毛纺厂某回灌井是自

1968年开始回灌的多年回灌井，1978年11月至79年3月共回灌7万多吨；79年6月至9月月夏用水量6万多吨，其中60%的水温在 7°C 以下，见图2—12。

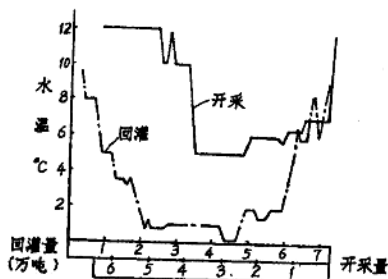


图2—12

②河谷平原：

我国内地一些工业城市如南昌、西安等大多开采河流阶地松散层中的地下水作为主要供水水源，这种含水层多为粗砂、砾石、甚至卵石，虽然地层也比较平稳，但自然流动大于滨海平原。

例如，南昌江西纺织印染厂座落于赣江一级阶地，含水层为砂砾石层，渗透系数50~70米/日，原地下水温度约 20°C ，以赣江侧向补给为主，自1974年起，冬季取赣江水进行冬灌蓄冷，回灌水温平均约为 10°C ，至1979年全厂回灌井已达17眼。几年来，蓄冷效率逐年提高，1979年达50%，夏用水温逐年下降，以19号井为例，1975年夏季开采出的水温为 $14.6\sim 18.7^{\circ}\text{C}$ ，1979年夏用水温降至 $12.4\sim 16.5^{\circ}\text{C}$ ，从而使全厂空调系统的机器露点普遍下降 4°C 。

③山前平原：

我国一些城市如北京、石家庄、沈阳等地处山前平原。山前平原由山区河流进入平原以后形成的冲积扇组成，冲积扇顶部，沉积颗粒粗大，以大卵石、砾石为主，透水能力强，地下水自然流速大，一般不宜于蓄能。

例如：石家庄位于漳沱河冲积扇顶部，该市第二棉纺织厂曾连续二年进行管井回灌

试验, 结果蓄入的冷量全部散失。

又如, 1977年在北京西郊八一湖南岸进行的一次回灌试验。该试验场位于永定河冲积扇中上部, 含水层为砂卵石, 渗透系数达360~410米/日, 自然水力坡度为0.0035, 以比原地下水温平均高13.2℃的湖水回灌, 每天回灌量1124.8吨, 回灌48天, 总回灌量为51420吨, 但是, 停灌以后, 含水层温度迅速下降, 蓄存效果不佳。

冲积扇中下部地形逐渐变缓, 沉积颗粒较小, 例如, 北京第三棉纺厂地处冲积扇中下部, 含水层以粗砂、砾石为主, 渗透系数为30~35米/日, 回灌水来自距回灌区约800米的三口深井, 经大气式冷却池喷淋降温后灌入地下含水层, 平均回灌温度约5~6℃, 自1970年至1979年“冬灌夏用”量达600万吨, 虽然夏用水温已由原15℃降至12~13℃, 但蓄存效率不高, 一般未超过30%。

(2) 回灌技术

为了很好地进行地下含水层蓄热, 除选择合适的地质条件以外, 回灌技术是重要环节。回灌技术包括回灌井的构造与布置, 回灌方法, 堵塞与防止, 以及回灌水质等方面, 下面仅介绍回灌方法以及堵塞与防止。

①回灌方法与回灌量

采用管井回灌时, 回灌量与含水层的水文地质条件、井的构造和回灌方法有关, 我国目前采用的回灌方法有真空回灌, 自流(无压)回灌和加压回灌三种。

真空回灌: 真空回灌适用于地下静水位较深(低于10米)和渗透性良好的含水层。再者, 由于真空回灌对滤网的冲击力较小, 故很适用于滤网结构耐压较差的老井。

真空回灌的回灌量与地下水位有关, 地下静水位越低, 回灌量越大。另外, 主要还与含水层的地质条件有关, 对于第四纪松散沉积层来说, 颗粒细的含水层, 单位回灌量一般为单位开采量的 $1/3 \sim 1/2$; 而颗粒粗的含水层则约为 $1/2 \sim 2/3$ 。

自流(无压)回灌: 自流回灌适用于地下水位较低, 渗透系数大的含水层。其优点是设备装置简单, 我国南昌和杭州都采用此种回灌法。南昌江西纺织印染厂的含水层为砂砾石层, 渗透系数为50~70米/日, 单井回灌量约800吨/日, 为单井涌水量的50%左右。而杭州第二棉纺厂的厂区内有一卵石含水层, 渗透系数为149~609米/日, 单井回灌量可达单井涌水量的75~90%。

加压回灌: 加压回灌适用于地下水位较高, 含水层渗透性能较差的含水层。但是, 回灌时对井管滤网和含水砂层冲击力较大。上海市区普遍采用此法回灌, 一般控制回灌压力在2.2~2.8表压范围内, 回灌量大体与压力成正比。北京西郊八一湖岸试验场也采用压力回灌, 整个试验过程, 压力保持在3.5表压; 根据试验测量, 对于该含水层回灌压力 P (表压)与回灌量 Q (吨/小时)的关系为 $P = 0.00175Q^2$ 。

②堵塞及其处理方法

回灌井或其附近含水层堵塞是管井回灌中普遍存在的问题。根据我国多年的观察分析, 第四纪松散沉积层发生堵塞的原因大体有以下三种。

1) 物理堵塞: 造成物理堵塞现象的原因主要是气塞和混浊物堵塞。

当回灌管路装置密封不严, 会使大量空气随回灌水一起进入含水层, 充填于砂层孔隙中, 造成渗透能力减弱, 回灌量下降, 这就是所谓气塞。而回灌水中含有的悬浮物和胶结体, 即使含量微少, 但经长期积聚在滤网外或含水层中, 就会造成混浊物堵塞。上述两种情况, 在回灌过程中难以完全避免。

至于采、灌两用井, 由于回灌与开采长期交替进行, 造成井附近填砂层和含水层砂的颗粒排列发生变化, 也会使透水性能降低。但是, 发生这种堵塞的过程十分缓慢, 一般几年或十几年以后才逐渐有所反映。

2) 化学堵塞: 化学沉淀堵塞是管井回

灌中最主要的一种堵塞。地下水含有多种可溶性盐类和气体,对金属、井管具有化学腐蚀和电化学腐蚀作用。由于回灌,使水的温度和压力发生变化,加速腐蚀过程,沉淀物沉积于砂层中;而回灌水中含有的空气进入含水层后,增加地下水中的溶解氧,当与地下水中的盐类接触,也会生成不溶于水的沉淀物,从而造成化学堵塞。

3) 生物化学堵塞:生物化学堵塞是微生物的活动过程所造成的,根据对上海地区回灌井的调查,主要是铁细菌造成的堵塞,铁细菌是一种利用 Fe^{++} 离子氧化为 Fe^{+++} 离子时的能量维持自身存在的菌类,它们在水中集结成群,加速 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ 溶液和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 溶液中 Fe^{++} 的氧化,形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀。冬灌夏用井发现有铁细菌繁殖,其危害性很大,若不及时处理,其繁殖速度很快,井管很快被腐蚀穿孔以至破裂。

回灌井堵塞的处理和防止主要采用回扬法,一般真空回灌每天回扬一次,压力回灌每天回扬2~3次,回扬时间以抽出清水为限,约15~30分钟。

当堵塞程度比较严重时,可采用回扬反冲法,即在连续回扬过程中,几次停泵3~5分钟,利用井管内跌落的水柱压力冲击堵塞的砂塞。但是,应用此法时,井管滤网强度要好,而且,反冲必须在回扬出清水后进行。

至于化学沉淀堵塞和生物化学堵塞目前尚无防止方法,如果沉淀是 CaCO_3 或 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 与砂胶结成块,在滤水管上形成坚硬的水垢时,可用10%的稀盐酸进行酸洗处理。

(3) 经济效果

经过多年的实践证明,对于有合适的地下含水层的地区,利用地下含水层蓄热,可以提高能源利用率,能为工厂提供廉价的能源,是解决能源危机,扩大能源的有效途径之一。在上海已广泛应用于纺织、化工、影

院……等夏季空调降温、冷却、洗涤以及冬季供暖加湿,锅炉用水等方面。

以上海三十多家纺织厂为例,每年夏季可从冬灌夏用井中开采980万 m^3 低温水,用于车间空调冷却,可利用低温水的平均温度达13℃,可提取的冷量为1270亿kcal,折合每小时1.27亿kcal,约占棉纺系统空调降温总需冷量的60%。如果与用冷冻机取得相同的冷量相比,每小时可节电达三万多度,与用蒸氨或溴化锂制取相同的冷量相比,每小时可节电1万多度,节煤达70吨。

近年来,随着冬灌夏用的扩大,含水层蓄热的利用已越加广泛。现全上海市区每年冬季从夏灌井中可抽取400万 m^3 热水,平均可利用水温差为8℃左右,全市可获得320亿kcal热量,与采用锅炉制取相同的热量的耗煤量相比,可节煤6500吨。

(四) 以岩石为蓄热介质的蓄热装置

以岩石作为蓄热介质和以水作为蓄热介质相比较,其热容量比水小,约为水的1/2,故在蓄热容量相同的情况下,所用岩石体积要比水约大1倍。但由于岩石价格比较便宜,且能耐高温,所以也是良好的蓄热材料。它不但已广泛应用于太阳能空气系统作短期蓄热,而且也可以用于电厂等方面作短期的高温蓄热。地下岩石蓄热库在长期蓄热方面也是有吸引力的。

1、岩石蓄热箱

图2—13是一种用于太阳能空气系统的岩石蓄热箱的结构示意图,其中(a)为垂直箱,(b)为水平箱。它的容器一般由木、混凝土或钢制成,为了减少热损失,外表面要有良好的保温。为了防止空气泄漏,箱子要密封。如可用环氧树脂或其它热阻值适宜的化合物堵缝,顶盖要用丁基橡胶或其它合适的材料密封,密封材料要经得起最高温度。为了使容器断面能均匀分配气流,箱子的上、下部要留出必要的空间充满空气,这种蓄热器的特点是载热体和蓄热介质直接