

# 地热技术概述

## ——从勘探到开发利用



二〇一〇年六月二十日

# 目 录

<b>1. 地热资源利用领域.....</b>	<b>1</b>
§1.1 地热发电 .....	1
§1.2 地热供暖 .....	1
§1.3 地热务农 .....	1
§1.4 地热行医 .....	2
§1.5 GIS技术 .....	2
<b>2. 地热资源普查方法.....</b>	<b>3</b>
§2.1 地球化学和地质学方法 .....	3
(1) 地球水化学调查 .....	3
(2) 绘制水热蚀变图 .....	3
(3) 测量土壤中的微量元素 .....	3
(4) 热释光(TL)年代法 .....	3
§2.2 地球物理勘探方法 .....	3
(1) 直接方法 .....	4
(2) 间接方法 .....	4
§2.3 遥感遥测方法 .....	5
§2.4 利用地理信息系统技术探测地热.....	6
§2.5 地热勘探技术发展趋势 .....	6
(1) 多种勘探方法的综合运用 .....	6
(2) 遥感技术的应用 .....	6
(3) 3S技术的发展与运用 .....	7
<b>3. 地热勘探技术.....</b>	<b>8</b>
§3.1 地质技术 .....	8
§3.2 地球化学技术 .....	8
§3.3 地表温度和热流测量 .....	9
§3.4 阻率测量 .....	9
§3.5 大地电磁感应法.....	10
§3.6 重力法 .....	11
§3.7 水银蒸汽分析法.....	12
§3.8 磁法 .....	13
§3.9 地震勘探技术 .....	13
(1) 野外数据采集方法 .....	14
(2) 地震资料处理 .....	15
(3) 地震资料解释 .....	15
§3.10 计算技术 .....	15
§3.11 遥感技术 .....	15
§3.12 超长电磁波地下遥感技术 .....	16
(1) 基本原理 .....	16

(2) 解译标志 .....	16
(3) 解译方法 .....	16
§3.13 5m高精度地温测量法 .....	16
<b>4. 地热资源评价方法 .....</b>	<b>18</b>
§4.1 常规方法 .....	18
§4.2 蒙特卡罗法并与单元热储体积法 .....	18
§4.3 数值模拟方法(反演模拟) .....	18
§4.4 中低温地热研究技术 .....	18
<b>5. 地热资源开发利用技术 .....</b>	<b>20</b>
§5.1 地热资源可持续发展利用的关键技术 .....	20
(1) 应用回灌技术, 实现采灌平衡 .....	20
(2) 应用热泵技术, 提高资源利用率 .....	20
(3) 低温采暖, 降低地热尾水温度 .....	20
(4) 梯级开发, 循环利用工艺 .....	20
§5.2 地热发电技术及存在的技术难题 .....	20
(1) 优势发电方式 .....	20
(2) 需要解决的重大技术难题 .....	21
§5.3 地热泵技术及存在的技术难题 .....	22
(1) 存在的优势 .....	22
(2) 存在的问题 .....	22
§5.4 地热水回灌技术 .....	23
(1) 真空回灌 .....	23
(2) 压力回灌 .....	23
(3) 地热水回灌存在的技术难题 .....	23
<b>6. 地源热泵技术 .....</b>	<b>25</b>
§6.1 直接膨胀(DX)热泵系统 .....	25
§6.2 混合热源(Hybrid)系统 .....	25
§6.3 垂直立井(Standing Column Well)系统 .....	26
§6.4 金属板式换热(Jim Slim)系统 .....	26
§6.5 热泵和燃料电池(Fuel Cell)复合系统 .....	26
<b>7. 地热发电技术 .....</b>	<b>27</b>
§7.1 直接蒸汽发电法 .....	27
(1) 背压式汽轮机循环系统 .....	27
(2) 凝气式汽轮机循环系统 .....	27
§7.2 扩容(闪蒸式)发电法 .....	27
§7.3 中间介质(双循环式)发电法 .....	28
(1) 有机朗肯循环 .....	28
(2) 卡里纳循环技术 .....	29
§7.4 全流循环式发电法 .....	31
§7.5 联合循环发电 .....	31
§7.6 干热岩发电 .....	31

## 1. 地热资源利用领域

### §1.1 地热发电

地热发电是地热利用的最重要的方式。高温地热流体应首先应用于发电。地热发电和火力发电的原理是一样的，都是利用蒸汽的热能在汽轮中转变为机械能，然后带动电机发电。所不同的是，地热发电不象火力发电那样要备有庞大的锅炉，也不需要消耗燃料，它所用的能源就是地热能。地热发电的过程，就是把地下热能首先转变为机械能，然后再把机械能转变为电能的过程。要利用地下热能，首先需要有“载热体”把地下的热能带到地面上来。目前能够被地热电站利用的载热体，主要是地下的天然蒸汽和热水。按照载热体类型、温度、压力和其它特性的不同，可把地热发电的方式划分为蒸汽型地热发电和热水型地热发电两大类。

### §1.2 地热供暖

将地热能直接用于采暖、供热和供热水是仅次于地热发电的地热利用方式。因为这种利用方式简单、经济性好，倍受各国重视，特别是位于高寒地区的西方国家，其中冰岛开发利用得最好。该国早在 1928 年就在首都雷克雅未克建成了世界上第一个地热供热系统，现今这一系统已发展得非常完善，每小时可从地下抽取 7740t80℃的热水，供全市 11 万居民使用。由于没有高耸的烟囱，冰岛首都已被誉为“世界上最清洁烟的城市”。此外利用地热给工厂供热，如用作干燥谷物和食品的热源，用作硅藻土生产、木材、造纸、制革、纺织、酿酒、制糖等生产过程的热源也是大有前途的。目前世界上最大两家地热应用工厂就是冰岛贩硅藻土厂和新西兰的纸浆加工厂。我国利用地热供暖和供热发展也非常迅速，在京津地区已成为地热利用中最普遍的方式。

### §1.3 地热务农

地热在农业中的应用范围十分广阔。如利用温度适宜的地热水灌溉农田，可使农作物早熟增产；利用地热水养鱼，在 28℃水温下可加速鱼的育肥，提高鱼的出产率；利用地热建造温室，育苗、种菜和养花；利用地热给沼气池加温，提高沼气的产量等。将地热能直接用于农业在我国日益广泛，北京、天津、西藏和云南等地都建有面积大小不等的地热温室。各地还有地热大力发展养殖业，如培养菌种、养殖非洲鲫鱼、鳗鱼、罗非鱼、罗氏虾等。

## §1.4 地热行医

地热在医疗领域的应用有诱人的前景，目前热矿水就被视为一种宝贵的资源，世界各国都很珍惜。由于地热水从很深的地下提取到地面，除温度较高外，常含有一些特殊的化学元素，从而使它具有一定的医疗效果。如含碳酸的矿泉水供饮用，可调节胃酸、平衡人体酸碱度；含铁矿泉水饮用后，可治疗缺铁贫血症；氢泉、硫水氢泉洗浴可治疗神经衰弱和关节炎、皮肤病等。由于温泉的医疗作用及伴随温泉出现的特殊的地质、地貌条件，使温泉常常成为旅游胜地，吸引疗养者和旅游者。在日本就有 1500 多个温泉疗养院，每年吸引 1 亿人到这些疗养院休养。我国利用地热治疗疾病历史悠久，含有各种矿物元素的温泉众多，因此充分发挥地热的行医作用，发展温泉疗养行业是大有可为的。

## §1.5 GIS 技术

地热地理信息系统的基本模型中一般使用关系型数据库对地热及相关数据进行存储，并提供和使用一系列空间分析工具，可以在三维空间内定位地热井，模拟热储的空间展布，绘制地下水等温线、等水压线，制作地热水化学分布图，以及了解地热井附近交通，经济和住宅分布等情况。另外，一些较为完善的系统模型还包含网络模块，用来协同工作和数据共享。下面将对几个具有典型特征的系统进行介绍，其中包括莱布尼茨应用地球科学研究所建立的一个地热管理信息系统，其特点是网络交互功能完善，但三维热储展示模型的建立需要依靠于其他商业软件 GManager 系统的特点是具有出色的数据校验系统及安全的数据访问方式，既保证了数据的多样化视图，又保证了数据的安全性，BDGEO 系统的特点是提供了一系列的地热资源空间及属性的分析工具，并建立了多个用于地热开发利用的专家系统；国内何满潮等人所建立的中低焓地热工程信息系统采用了先进的三维建模方法，并提供了针对渗流场，化学场，地温场和沉降场等的分析系统。

## 2. 地热资源普查方法

### §2.1 地球化学和地质学方法

#### (1) 地球水化学调查

在不同的地质条件下形成的地下热水,都具有其特有的化学组成,它们与当地的浅层冷水有明显的区别。热水的化学成分提供有关地热水的来源及热储温度的信息.因此在寻找地下热水时进行化学普查,找出反映当地地下热水的“标志组分”,如  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na/K}$  等,通过判断“标志组分”的存在与否,含量高低,能够提供寻找地下热水的重要线索.地热系统温标的使用即是成功的例子。

#### (2) 绘制水热蚀变图

在由于植被覆盖而不易观察的地区,在地表可以测出由于水热活动而使岩石发生蚀变的区域,将这些区域绘制成图确定水热范围,再根据水热活动的持续时间和蚀变岩石的体积大致估计热源强度.绘制水热蚀变图可用于勘探年轻的火山地区的地热。

#### (3) 测量土壤中的微量元素

有些地热异常在地表并没有出现热水活动标志,可以通过测定土壤中的微量元素,如氦、二氧化碳等进行地下高温区的地化勘探。沉积岩中含碳物质的蚀变地热异常区内碳化程度的高低能提供有关温度-时间影响因素的信息,可以通过测量沉积岩中含碳物质因蚀变产生的物质(如天然气)的富集程度,圈定出具有最高温度的区域。

#### (4) 热释光(TL)年代法

热释光(thermo luminescence, 简称 TL)年代法最早用于考古学,是利用古陶器、砖瓦等标本中的石英、长石等碎屑矿物的天然 TL 量烧制年龄的量度,后来用于地质学领域.石英、长石等矿物具有良好的热释光特性,可用于测定年轻的热源岩石如火山岩及变质岩的年龄,可用以调查地热资源.全亚荣采用改进的热释光年代法对日本若干地热区的地表变质岩作 TL 年龄测定,取得了较好的效果.Noriyoshi Tsuchiya 等人利用石英的热释光特性对日本东北部的 Kakkonda 地热系统进行了地热活动性评价,也认为热释光法是一种有效的地热勘探方法。

### §2.2 地球物理勘探方法

地球物理勘探适宜于圈定地下深部热储的位置,其任务是:确定与地下热水有关的地质

构造,火成岩体的分布、规模和性质,查明各种断裂的方向和性质,查明第四纪覆盖层各含水层的水文地质特征,判断地下热水的分布与埋藏状况等。李春昱的研究表明,板块构造与地热分布有极其密切的关系。因此,通过研究板块构造可以为地热资源的探测提供宏观上的指导。地球物理勘探方法分直接和间接地测量温度、热储方法。

### (1) 直接方法

直接方法是通过使用一定的仪器如温度计(电阻温度计、热敏电阻和热电偶等)、常温下测定岩石热导率的稳定平板热导仪、红外测温仪、热红外照相机、辐射仪,直接测量地表、近地表和地下,如井、泉和钻孔的温度。该方法在某些地质体中 useful,如地下热水达到地面且排放量相当可观时,可辨认出地热异常。在地面上用机载或星载红外测温仪接触(热敏电阻测温计)或非接触(如红外辐射测温计)方式测量地表或地下一定深度的温度,通常对于圈定热源位置更精确和迅速。测量地表的温度变化,对于标绘出热异常区内的对流传热带极为有效。在合适的情况下,如果测到两个深度处的温度,就可以估算出热源强度。红外探测技术具有速度快、探测面积广等优点,可作为大面积地热资源普查及了解热场分布概貌的有效手段。

### (2) 间接方法

间接测量温度和热储的方法,是基于过去数十年确定地球内部岩石物理量的地球物理测量技术和解释技术的完善,依据某些与温度相关的物理参数就可以判定出温度和热储的大小。间接方法通常有重力测量、地电测量、地磁方法、地震方法。

#### ◆ 重力测量法

在具有诸如蒸汽或温泉等地表显示的热异常区,常常伴随有负的布格异常。在详细了解了地质构造后,采用重力测量方法定量估计温度分布,重力测量结果有助于确定地热异常区内具有最大热量的位置和勘探孔、开采孔的选择。

#### ◆ 地电测量法

地电测量方法是一种比较简便的方法,该方法利用地下电阻率的分布确定地热异常区的温度和热储以及控热构造。自然电位法已用于不少地区的热异常研究中,研究表明自然电位异常与温泉和蒸汽排泄区位置对应得很好。大地电磁测深法是上世纪 60 年代发展起来的一种利用不同天然电磁场和可控制的人工电磁场,了解地下深层不同深度介质的电性分层,用以推断控制地热孕育、发生、发展、储藏的构造以及了解地下热储的温度状况的方法。该方法若能与天然地震转换波法等配合使用,效果更好。Santos 等使用了音频大地电磁方法调

查了葡萄牙一个地区的地热田.吴璐苹、石昆法等利用可控音频大地电磁法(CSAMT)对松山断裂型地下热水进行了勘探,认为 CSAMT 法勘探水资源工作效率高,勘探深度大,勘探环境适应范围宽,并在专著系统地叙述了 CSAMT 法的基本原理和在地下热水等探测中的应用.另一种叫瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Methods, 简称 TEM)的探测方法在云南腾冲地区的地热探测中得到应用。

#### ◆ 微震法

反射和折射地震法也已用于一些地区的热储勘探.地热异常区内由于蒸汽和热水的上升流动,使地面产生微小颤动或震动,发生局部的蒸汽爆炸,即微震的增加.因此用高精度微震仪探测可圈定热水上涌通道、分布范围等,还有可能圈定温度远高于 100 度的热储位置。

## §2.3 遥感遥测方法

遥感技术发展了近 30 年,已广泛应用于各个领域,特别在地质方面的应用比较成熟.随着遥感新技术的发展,地面温度除实测外,现在可以通过卫星上的红外通道探知.航空航天热红外遥感以下垫面温度场为调查对象,在地下热水、地表水体热污染、城 1.2 地热资源勘探方法.城市热环境以及其它具有热差异的调查研究,如地震前的热异常中已有成功的经验。

卫星的热红外遥感图像可以直观地显示地热资源及地表水和浅层地下水的地理分布.太阳能和地下热能昼夜不断向外传输都使地表具有一定的温度,在热红外波段上以不同的灰度值来体现出来.地表温度约为 300K,它的极大电磁辐射波长为  $8\sim 11.30\mu\text{m}$ ,即热红外波段,这一波段在白天和晚上都有记录.此外,热红外遥感对大气层有较好的穿透能力.利用热红外探查地热资源是比较成功的,遥感图像不仅能间接反映地热资源的形成与分布的背景,热红外遥感图像还能直观地显示地热资源的分布.地热资源形成和赋存条件有一定的地质构造背景,如年轻的或者一直在活动的造山活动、火成岩体的分布、规模和性质、断裂构造等.不同成因的地热资源分布有不同的特点,地热的赋存状态不同,有的属于有天然地表热显示的地热资源,有的属于隐伏型地热资源,无地表热显示.可以利用遥感数据如 Landsat/TM、NOAA 卫星热红外遥感数据,通过一定的图像处理技术,解译出与地热有关的主要断裂构造、区域地质构造、隐伏地质构造等,从而间接找到地热.利用热红外遥感的基本原理,不同卫星的热红外遥感数据已被用来探测地热.杨锋杰等利用 Landsat/TM 卫星影像,特别是 TM 的第 6 波段(波长为  $10.4\mu\text{m}\sim 12.5\mu\text{m}$ )研究了泰安市郊区的地热异常区.首先对 TM6 热红外波段结合另外 6 个波段进行处理后(密度分割等)提取区域的地热信息,并对解译出的



地热异常区用物探和实地测温验证发现新的地热异常区,总结出了一套地热调查方法.郝艳梅等利用 Landsat5/TM 对河北省邯郸市下庄地区的地热资源进行了勘探.葛碧如研究了 NOAA211 和 NOAA29 气象卫星的 AVHRR 发回的热红外波段数据(ch4:10.3~11.3  $\mu\text{m}$  以及 ch5:11.5~12.5  $\mu\text{m}$ )中包含的地热信息,分别分析了云南省西部的中高温地热分布和闽东地区中低温地热.其方法是利用地面站获得的晴空无云的 AVHRR 白天和夜晚两时相资料,经过常规的大气校正和几何订正后,通过统计分析,突出显示高亮温段的像元并确定其地理位置,再与地面资料比较.得出的结论是遥感探索的结果与 80 年代水热考察结果相比,基本上一致,还发现了新的地热点。

## §2.4 利用地理信息系统技术探测地热

地理信息系统所具有的数据输入、显示、空间分析等功能使之成为使用计算机化方式综合解译地球科学数据,特别是勘探工作中的重要工具。Prole Ledesma 利用 GIS 对墨西哥的 Los Azufres 地热田的遥感资料、地表勘探资料(主断层、表面破碎密度、地表活动、电阻率等地球物理、地质资料以及其它资料)进行综合分析,并建立了基于该区域概念模型的三个知识驱动模型:布尔、索引叠加和模糊策略模型。利用 GIS 方法对地热勘探评价效果很好,而且有利于建立地热管理信息系统。GPS 由于其定位的快速和准确,在确定了地热靶区后,用它进行地热精确定位,具有省时、省力、高效的特点。

## §2.5 地热勘探技术发展趋势

### (1) 多种勘探方法的综合运用.

一般来说,对于某个地区地热的探查都要综合用到几种方法以互相印证,才能确定地热状况.靳宝福和程力军利用以电阻率测深法为热田勘探的主要手段,以重力、磁法为勘查的辅助手段,并配以联合剖面法开展了西藏地热田的综合物探方法。Tsokas 和 Hansen 等人对希腊一个地区的地热作了地质和地球物理研究.在对南大西洋的上升岛的地热勘察中,综合使用了地质化学、航磁方法、电阻率方法、地震活动法等方法进行研究。

### (2) 遥感技术的应用

遥感数据是探测地热的重要数据资料.随着热红外遥感卫星技术的发展,热红外通道的增加、波段宽度的减小,图像处理技术如多源信息融合技术的发展,遥感信息模型的建立,有可能通过反演建立地表温度与遥感数据之间的定量关系.遥感技术所具有的概括性、综合性、宏观性、直观性而且成本低的特点,可以使地热调查手段得到很大的改进.特别对于交

通不便及环境恶劣的地区,遥感方法在地热资源探测中更具有独特作用.1999年,美国新一代对地观测系统(EOS)计划中TERRA卫星发射的成功,是人类对地观测的又一个新的里程碑。TERRA卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)采集的数据有36个波段,地面分辨率为250~1000m.这36个波段中有6个波段(中红外:20、21、22、23波段和热红外:31和32波段)的基本用途是研究地表温度,而且每天上、下午可以采集数据以及数据接收是免费的,因而MODIS数据可成为地热资源探测以及其它资源和环境监测不可多得的数据资源.但目前这方面的成果还比较少见,方法还不够成熟,还需要大力加强研究.利用MODIS数据高光谱分辨率的优点融合其它卫星数据,如陆地卫星TM数据的高空间分辨率的优点来勘探地热资源,也是地热探测的一个重要发展方向.

### **(3) 3S 技术的发展与运用**

随着遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS),3S技术的集成研究的深入和计算机模拟技术等的发展,地热资源的勘探方法也必将取得突破性的进展.

### 3. 地热勘探技术

#### §3.1 地质技术

某些储热的位置与地质环境有关。许多发表的文献中讨论了地热体系与第三纪—第四纪晚期火山作用同地壳构造运动的关系。从地表观察到的温泉和喷气孔现象能揭示深处的热源。断层对于流体的传导是重要的。某些岩石具有流体流动的必要的渗透性，换句话说，有许多岩石对于地热区是不可渗透的盖子。详细的地质图和地质说明，对于成功的地热源勘探施工，都是很重要的依据。

#### §3.2 地球化学技术

大家知道，放射性元素能自发的进行衰变，产生 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线，三种射线都有一定的穿透能力， $\gamma$ 射线穿透能力最强，目前主要利用 $\gamma$ 射线探测地下水。

在地热区的深大断裂，使地壳深处的放射性元素及放射性气体可以沿热水通道带到地表。实际工作中，也证明许多热泉水含有镭、铀、氢气等成分，而且有些热矿泉水含放射性元素成分相当高。因此使用天然 $\gamma$ 法探测热构造及配合使用射气法测量土壤中的氢气的浓度是地热勘探的物探手段之一。

例如在广东从化温泉区，在大的断裂上布置了五条 $\gamma$ 测量剖面，都有下射线的高异常，图3是2号剖面下测量曲线图。异常值为正常值的1.8倍。该矿水温度为 $50^{\circ}\text{C}$ — $60^{\circ}\text{C}$ ，最高达 $70^{\circ}\text{C}$ 。岩层为燕山晚期中粗粒花岗岩。该区发育着数条断裂破碎带。

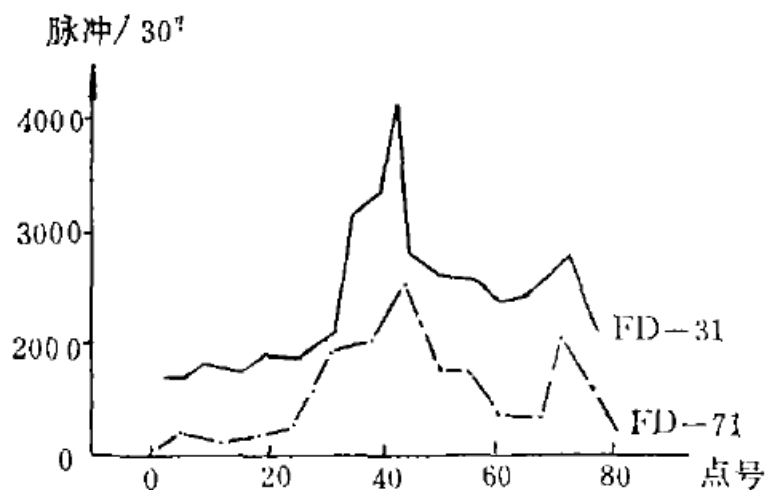


图3 广东从化温泉2号剖面 $\gamma$ 测t曲线图

在地热勘探和开发中应用地球化学的方法,揭示地热源究竟是蒸汽为主,还是热水为主。此外,鉴定水中的成份,有利于测定地表下温度和提供关于流体和岩石的资料,是有助于预示地热源的经济价值的资料。

### §3.3 地表温度和热流测量

地表温度测量,温度梯度测量和热流测定,在地热体系的勘探中,似乎是最直接的方法。

从地球中心到地球表面,有一个恒定的热流量,可由放热的化学反应、放射性、断层运动的摩擦和水的迁移,而产生低强度热异常,如发现高强度异常,可以说明地热区的存在。

通常在仅有几米深的深处测量温度和梯度,往往是不可靠的。最好采用测量热流的勘探方法,但需钻孔,深度范围为几十米至两百米,其缺点是费用很高。还可从飞机上进行红外辐射勘测,绘制热活动图,似乎是一种直接易得的方法。一般认为,由于地表物的发射率或传导率的差别,并因微气候因素(如因倾斜照射、雾、植被等所致的温度变化),这种方法受到限制。

### §3.4 阻率测量

电阻率法是勘探地热田中应用广泛且有效的方法之一。电阻率法所以用来寻找地热田,是因为反映岩石导电性差异的参数电阻率与岩层的湿度、含水的温度、矿化度等有密切关系。

岩石电阻率随温度而变化是由于充填在岩石孔隙中之水的电阻率与温度有关。在含溶盐的水溶液中,随温度的升高,溶液的粘滞性减小,离子的活动性增加,离子的迁移率增大了,所以电阻率随着温度的升高而降低。图 1 反映了水的温度越高电阻率值几乎直线降低。这样一来,从低电阻异常便可圈定地下热水分布范围。由于在野外实际观测的是视电阻率值,不仅受地下热水的影响,同时围岩电阻率也反映在观测结果中。因此,究竟根据多大视电阻率值圈定地下热水的范围,一般要通过试验确定,尽可能应用综合物探方法配合水文地质资料以便正确地圈定地下热水的分布范围。如在西藏羊八井地热田上取 30 欧姆·米等值线圈定地热田边界时取得了良好效果。

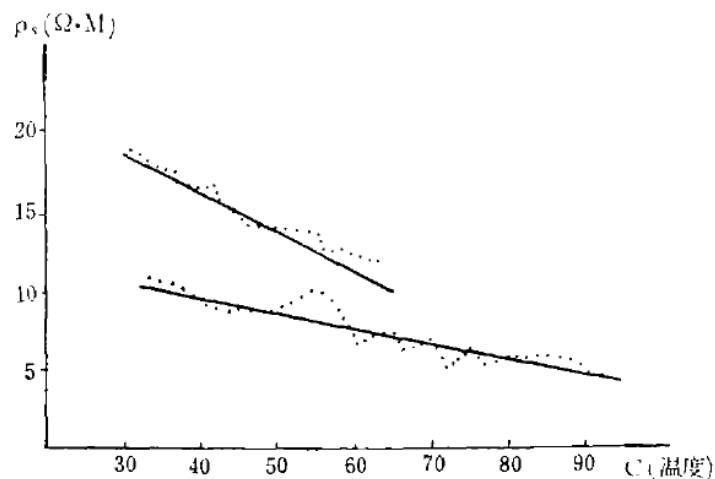


图 1 视电阻率(P)与温度(c)关系图

在地下水中溶有各种盐分,由于盐类的离子导电作用,使水成为良导电性物质而存在于岩层孔隙中。实验结果表明:矿化度增加不多,电阻率大大降低,而地下水电阻率与水中所含溶盐的种类关系不大。

应用电阻率法勘查地热田方面主要应用垂向电测深法和各种剖面法。应用垂向电测深法可以圈定热田的范围,对热田的盖层和储热体厚度进行定量解积。根据电测深资料有可能推测主要充填物是热水或是蒸汽。如果在多孔的储热体中充有热水且含一定盐类,必然表现为电阻率低值区,在热区以外电阻率迅速升高。蒸汽田的情况则相反,中心区的电阻率值可能为“高”值。应用联合剖面法或偶极剖面法查明地热田的构造,从而进一步确定热流体的主要通道及其大致产状。应用四极对称剖面法,采用不同大小的电极距了解不同深度岩性变化,从而确定地热中心地段(低阻带)或不同性质岩石接触面位置以提供与热源有关的资料。以联合剖面法和偶极剖面法作为确定构造轴线及产状的主要手段,用正交点的位置确定断层破碎带的位置,用四极剖面法及磁法圈定了地热中心带。

应用电阻率法研究地热田是相当成功的方法。在美国、墨西哥、日本、新西兰、澳大利亚、意大利、冰岛等许多国家勘查地热田时均应用了电阻率法并都取得了良好的地质效果。

岩石的电阻率,在很大程度上取决于岩石的孔隙度和裂隙水的浓度。因此预料,热水、盐水地热区的电阻率比周围岩石的电阻率较低。因为可以用较低的成本从地面测量获得大量地表下电阻率的资料,各种电阻率勘测都是很有价值的。缺点是由于地质条件的复杂多变可能引起电阻率的各种变化,单凭电阻率数据来进行判断,有可能引起错误。

### §3.5 大地电磁感应法

大地电磁法是利用频率范围从几十赫芝到几千分之一赫芝的大地电磁场进行勘探的,它

既可以单独利用电场或磁场，也可以利用电磁场，既不受高阻层的屏蔽，又对良导体有较高的分辨力。加之，它既灵活又轻便，所以越来越广泛被人们所重视。在地热田的勘探中，当然也不例外。事实已经证明，大地电磁法对解决热源在深部、地表有活动，储热体又为低阻层的地热勘探问题，是比较有效的，而且取得了越来越明显的成果。目前，世界上大多数开发地热的国家，都进行了大地电磁法勘探，仅在新西兰就有上百个热田，在美国西部有几十个热田上做了这种工作。

和其它电法不同，大地电磁侧深法可以研究深达几十公里、上百公里的上地幔构造。因此，在地热普查阶段，可用来寻找深部的低阻层和基底隆起以圈定可能存在热田的有利地区，在勘探阶段，可以确定储热体的大小、形态，计算盖层的厚度，圈定热田的范围等。甚至，在已知热田上进行大地电磁测深工作，还可以研究地热的机制，并指导进一步开发和勘探地热田。

利用声频大地电磁测深，可以进行几十米到几百米的浅层地热勘探。因为这种方法特别有利于寻找良导体，因此用以寻找以热水为主的热田(如充满热矿水的断裂带等)是比较有效的。美国在艾达荷州拉弗特河流域地区工作时(用 26 赫声频大地电磁测深)，用低阻等值线 3~10 欧姆·米圈定的热田范围与已知热田基本一致。

大地电磁感应法用来研究导电的均匀构造的磁化物矿区。地面和空中电磁法，对于深导电区制图是很有效的。某些地区可能很窄，如含有盐溶液的断层。

### §3.6 重力法

重力测量对区域构造的研究，无疑对寻找地热田提供了十分重要的区域地质资料。

在我国华北地区，利用重力资料划分区域构造是很成功的。图 2 是琢县—盐山布伽重力异常和 300 米深处地温剖面，重力异常十分清楚地反映了下古生界顶面的起伏，这一对应关系在华北具有普遍意义。而地下 300 米深处的地温曲线与重力异常曲线形态一致，重力高对应着浅部地温高值

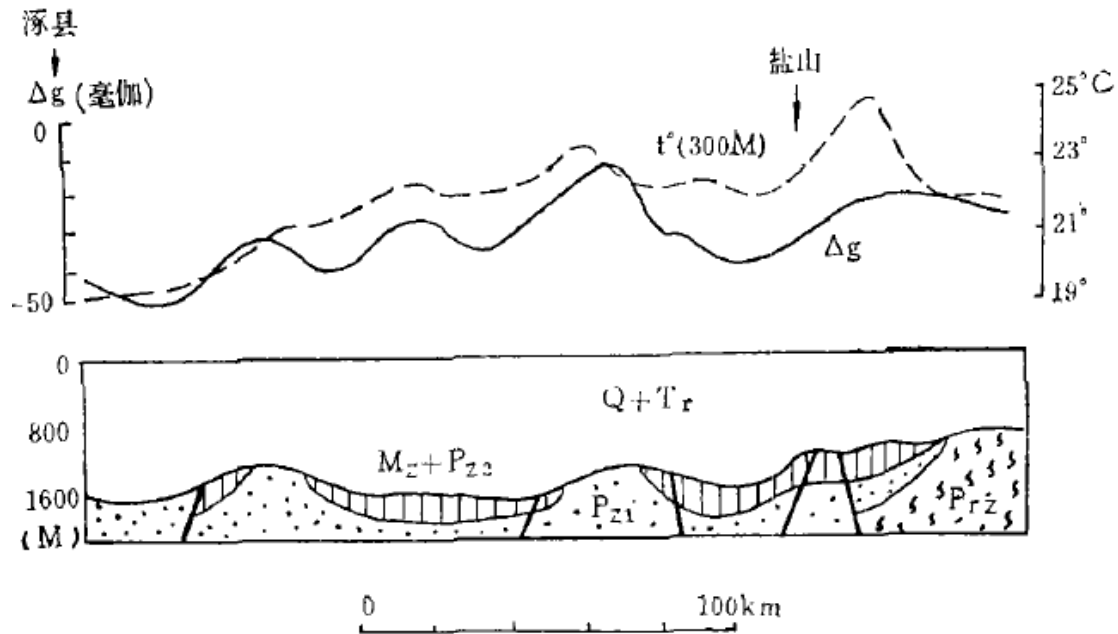


图2 涿县—盐山布伽重力异常和300米深地温剖面

Q—第四纪地层, Tr—第三纪地层, Mz—中生界地层, Pz:—上古生界地层,  
Pzi—下古生界地层, Prz—元古界地层

根据北京地区统计结果,布伽重力异常值与下古生界顶面埋藏深度的对数大致呈线性函数关系,因而布伽重力异常图在一定程度上反映了下古生界顶面的构造轮廓。在北京、天津地区都发现高温异常区分布在下古生界顶面隆起部位。

对于已经开发的地热田,可以利用重力测量监视热流的外流情况。随着热田的开发,蒸汽和水大量流出,当补给量小于排出量时,热田逐渐枯竭。地下物质的亏损将引起热田范围内重力值降低。例如一个含在孔隙度为20—30%砂层中的热水田,当由于开采水位降低1米时,重力值将减小0.008—0.01毫伽。如果重力仪观测精度达0.01毫伽或更高一些就可用于研究这个问题。

重力法已用于石油勘探,用来绘制以地下密度差为特点的地图。重力数据诠释会揭示背斜结构侵入岩和由热水循环导致的物料沉积造成的水成岩内的密集区。一般必须除去起因于基岩的区域效应并制备一种残余重力图。

### §3.7 水银蒸汽分析法

有证据表明地热源与汞基亚铁带密切结合,这二者发生在地壳构造活动区中。几乎每一个已知的地热源都发生在汞基亚铁带之中。

因为水银瓦斯具有更大的惰性,可从很大的深度升到地面上,特别是,如果热水循环的可渗透性有效的。许多文献的作者已经注意到火山中水银的反常浓度,热泉和其他地热能

的地面现象。水银瓦斯会依然密封在土壤中或升入大气。

虽然水银蒸汽分析技术还没有应用到地热勘探上,它是一种有潜力的强有力的而且成本低的方法。

### §3.8 磁法

在地热田的勘探中,与其他物探方法配合,可以利用磁法勘探提供结晶基岩的起伏和内部构造、断裂、火成岩活动等资料。

岩石的磁化率受温度影响,对于一种岩石当温度升高到某一定值时,它的磁化率将降至零。目前公认地热田的热源是地壳里发生的岩浆侵入活动,其深度通常为 7—15 公里,温度为 60.~90.℃。这个温度可能已超过居里点,这就为利用磁法勘探直接研究作为热田热源的侵入体成为可能。然而目前正在利用磁力观测资料研究居里面的起伏,一般认为居里面接近于花岗岩层底面,如果能确定居里面的局部隆起就可能对寻找地热田提供方向。

一些地区由于地热的作用,磁铁矿受热液蚀变成为无磁性的黄铁矿,造成热田范围内磁力异常值降低。新西兰在布罗德兰兹进行磁力测量和磁性研究,结果表明:从钻孔深部取出的样品磁化率低;从浅部(20 米左右)取出的样品磁化率高,深部磁化率低主要是由于岩石热液蚀变的结果。我国河北怀来地热调查中也发现岩石的磁化率在热水影响下,有明显降低的趋势,后郝窑热异常区表现最为明显,这里从山麓到覆盖基底都是片麻岩,但热水区磁力异常值比非热水区低 100—50。伽玛。片麻岩中含的磁铁矿,在热水作用下转化为无磁性的黄铁矿,使片麻岩发生了去磁作用。从岩心中看到的大量黄铁矿,可能就是这个原因造成的。

磁性图可用来说明火成岩的位置、热液变更区、结构特点并包括至基岩的深度。航磁绘图包括许多地区,所以不难以低成本获得有效的磁性资料。缺点是磁性数据的诊解,尤其是应用到地质勘探时,并不是简单易做的事。

### §3.9 地震勘探技术

地震勘探是一种间接的方法,不能直接找到地下热水资源,但是,它能准确地发现地质构造,特别是断层。因为不同的岩石以不同的速度传播地震波,地震技术可用来确定地下的某些性质。现行的地震技术用爆炸作为弹性波源并可用于绘制断层、地下地质结构和基岩。无源地震法监控低读数地震作业,与地热系统有关。

当前主要是应用二类地震信息:一类与天然地震信息有关的所谓微地震和地噪声,另一类是与人工激发的地震信息有关的地震勘探。



微地震的地质基础,是在高温地热区,由于断层活动,使微地震十分活跃,同时热水,汽在向上涌的途中使地面产生微小颤动或震动。用高精度的微震仪在这些地区做地震监视工作,对圈定高温地热区及热水上涌通道(断裂带)的分布范围是一种有效手段。近年来许多国家如新西兰,萨尔瓦多、墨西哥、美国、冰岛等在地热区都进行了微地震研究。例如萨尔瓦多沿阿瓦查潘断层带进行微地震观测,确定了地下含热水(汽)带的位置。

许多资料表明,高温地热区往往伴随着高的地声,这些噪声主要来自地热区的地下深部。某些研究结果表明,各个地热系统都有其特有的地震信息,可在某种频率范围内记录音频噪声的类型。

例如在美国加利福尼亚州东南部梅萨地热区进行地噪声测量的结果,表明在梅萨异常的南部及东南部有高的地噪声异常。又如在新西兰维奥塔普地热区在 0.3~30.7 赫芝的频率范围内做了噪声测定和频谱分析,同时测定了周期性的噪声日变。结果表明噪声高和温度高的地方同低电阻率(低于 5 欧姆·米)的地区完全一致。

人工激发的地震勘探,目前主要用反射信息和折射信息间接地研究与地热带有关的深部构造和岩性。1970 年日本学者早川在松川地热区进行反射地震勘探工作时,将多次覆盖技术(共深度点迭加技术)用于地热勘探使反射法揭示了四公里深的构造和岩性。值得指出,地震反射波的振幅、频率、速度等信息已开始加以利用。据日本在三个地热带用地震反射法勘探的结果认为:高频率、小波幅区是与岩浆侵入有关,而低频率、大波幅区则与破碎的储热体有关。新西兰布罗德兰兹地热区应用地震折射法结果表明,地震波的速度与热液蚀变及温度有关:温度高并发生热液蚀变的地方,地震波速度增大。随着利用计算机对地震资料处理技术的不断发展,地震信息的充分利用,将会更加有利于地热勘探。

断层活动、热水或蒸汽的活动会引起这种微地震运动。由于断层是一个很好的导水通道,是地下热水资源的富集区。只要确定了断层的位置也就确定了地热资源的富集区。

### (1) 野外数据采集方法

合理选择各种野外采集参数,可以有效地抑制干扰,突出有效波,提高对小地质构造的分辨能力,试验的目的就是研究分析该区影响地震资料品质的主要因素及提高地震资料信噪比和分辨率的施工方法与技术。因此,必须在理论分析计算的基础上通过试验选取最佳的采集参数与施工技术。

通过充分的试验对比,在井深大于 20m,药量 2kg 的情况下,干扰波背景较小,有效波能量较强,频率较高,能达到本次勘探的要求。经过野外实地踏勘,收集并分析已有地质

资料,综合考虑勘探区的地质任务、地形地貌、目的层的赋存深度及构造情况等,根据试验结果并结合区内实际情况,实践中勘探采用了固定排列观测系统,开动 60 道接收,最高 60 次覆盖,道距 15m,炮距 15m。

## **(2) 地震资料处理**

资料处理所采用的处理软件为法国 CGG 公司 Geovectur Plus V6.1 软件包和美国 Green Mountain V5.1 版本的绿山初至折射静校正软件。

本勘探区资料处理的重点是提高深层的信噪比,从而达到对深层地质构造的准确识别。在处理过程中,坚持试处理、批量处理和改善处理三步法。处理与解释交互进行,以提高处理成果的质量和解释成果的精度,达到本次勘探任务的要求。

## **(3) 地震资料解释**

在收集有关已有的地质资料的基础上,掌握区内地质构造规律,将宏观的区域地质构造规律和本测区的微观地质构造规律相结合。并结合地质勘察任务,对深部资料进行反复对比研究,找出断裂带的位置和发育规模。

## **§3.10 计算技术**

应用数学方法模拟地下炸药、空气和水污染物的转移扩散以及地震运动,用一种计算机阐释多相可变形地质媒体中质量和能量的运动,并可预示储热层的特性;还可估价地面沉降和由于开采地下水或反复向地层中注入液体而引起的地震危险。

## **§3.11 遥感技术**

装在飞机上的遥感器可从 10 公里高空观测地面上情况,一张照片可拍摄升平方公里的地面。遥感系统可以探测地表水份的变化和地下水位深度,可以识别地热资源。

飞机和卫星装备可在多个波段工作的多谱红外热象仪,可在全球范围或大片地区拍摄红外照片,寻找矿物、水源、地热等。

通过卫星从空中勘测地球资源,可以解决从地面上和飞机上解决不了的许多问题,并大大提高工作效率。可以相信,在不久的将来,遥感技术在发展地质勘探(包括地热勘探)方面,将起到更加巨大的作用。

## §3.12 超长电磁波地下遥感技术

### (1) 基本原理

超长电磁波地下遥感技术[3]因其使用的电磁波的波长可穿透深部地层。来自太阳的能量和电离层反射全球雷电能量注入地下,与地下不同深度的地质岩体相互作用可产生不同频率的超长电磁波,并传到地面上来。利用超长电磁波探测仪接收记录来自地下的超长电磁波。超长电磁波频谱曲线振幅强弱,主要与岩石密度、胶结程度、破坏程度以及磁性和介电常数有关系,频谱曲线能反映出有岩性差别的“岩性界面”、“风化面”、“断层面”及“含水部位”。

### (2) 解译标志

超长电磁波频谱曲线形态特征可用幅值、均匀度、平稳度、稀疏程度来描述。频谱曲线解释主要是分析曲线的幅值变化,通过不同深度频谱曲线的变化及不同测点频谱曲线对比,即可划分不同的地质界面、断裂构造及含水部位等。

### (3) 解译方法

频谱曲线解译是一个综合分析研究过程,既要频谱曲线特征作深入细致的分析对比,又要对测区地层、岩性、构造、水文地质等有较详细的了解。频谱曲线解译要遵循由已知到未知,先易后难的原则,解译时,首先考虑哪些属于电干扰、外来脉冲干扰,哪些属于有用的地质信息,排除干扰信息,提取有用地质信息。

## §3.13 5m 高精度地温测量法

5m 高精度地温测量法是在第四系土层中测温,深度为 5m,测定一个点后再移动到下一点去,故也称 5m 移动测温,效果较明显。为此曲阜市地热地质普查将该方法做为重点的工作方法。将所有 5m 测温点均按剖面布置在重点工作区内。其主要目的是用于了解地温场在地下浅层的显示,了解地温场的平面变化及隐伏断裂构造的位置。

采用先进的专门用于地温测量的晶体数字式 JW-2 型测温仪及相应成孔和探杆器材,采用先成孔,后测温的方法进行,即前面施工成孔,后面进行温度测量,控制成孔时间和测温时间一致。在正常情况下,前面打一个钻孔,后面正好测完一个钻孔,时间间隔相同,一般一个孔测温时间约为 20min。要求干式成孔,保证测温仪器探头充分接触原始土壤。每个钻孔在 5m、3m、2m 分别进行,每个测温数据都是等待仪器数据显示稳定后再读数记录。以上做法保证了数据的可靠性和各数据间的可比性。

地温场(地热场)是表示地球内部各层某一瞬间温度分布状况的地球物理场,它是空间和

时间的函数。而地温场,是现在地质历史时期的一瞬间,认为地质演变相当缓慢,可作为相当稳定的地温场来研究。地温场通常是由一些表征地热现象的物理量来组成的,如大地热流值,不同区位、层数的地温梯度,不同的温度等。该方法是通过测量研究同一层位的温度变化,反映地温场。

地下深部的热状态会通过不同的渠道和介质向上移动,进而影响浅层地温,并受浅层岩土、地下水运动及大气温度影响,共同构成浅层地温变化分布,而浅层地温尤其在 5m 以下的地温,主要受深部地温状态影响。

- ◆ 该方法理论依据充分,影响因素清楚,数据处理可靠,判定地质和地热信息明显直观,方法实施简便,工作费用低。
- ◆ 5m 地温调查工作,主要目的是用于了解地温场在地下浅层的显示、了解地温场的平面变化及隐伏断裂的构造位置,同时可以综合定性判定断裂的导水导热性质,为地热勘探提供重要的地热信息。由此可以推广用于其它地质勘探中,用于判定断裂构造的位置和性质。

## 4. 地热资源评价方法

### §4.1 常规方法

目前, 国内外评价地热资源时, 常用的方法有: 热储体积法、地表热流量法、平面裂隙法、岩浆热量框算法。利用上述方法评价热储层地热资源时, 是以热储参数为定值进行计算。实际上, 对于一个热储层来说, 由于众多因素的影响, 所测的热储参数往往是具有一定取值范围的随机变量。蒙特卡罗法作为一种考虑变量随机特征的方法, 可以很好地解决计算结果的可信度问题。但由于该法计算时需要较多的热储资料, 目前尚未在地热资源评价中应用。

### §4.2 蒙特卡罗法并与单元热储体积法

### §4.3 数值模拟方法 (反演模拟)

基于三维稳态热传导理论并忽略对流换热及地质构造等次要因素影响的地温场与地温梯度场的反演方法。该方法可以在大尺度上数值模拟岩体中地温的空间分布状况, 并预测高温岩体地热资源量。以云南省腾冲热海热田为例, 模拟和分析了地质体的地温与地温分布梯度场的特点及其形成原因, 并对热田高温岩体地热资源量进行了预测评价。

要相对准确地获得地温分布特征, 最可靠、最直接的方法是通过深钻获得地质体温度。但深钻费用高昂, 很难进行普查与详查, 地球物理手段也受到技术限制, 只能通过极少量的深钻获取极为有限的局部地温分布资料。而采用数值模拟的方法, 以已知空间点的分布为基础进行地温分布的反演模拟即可获得区域地热温度场。

### §4.4 中低温地热研究技术

到上世纪 70 年代以来热储工程这门科学已得到迅速发展, 每年在美国加利福尼亚的斯坦福大学召开热储工程讨论会, 会后发行论文集, 内容包括: 世界热田情况; 水热系统; 井试验; 两相流; 地球物理测井; 模拟; 石油地热和地压地热能源; 井回灌及热储化学等。

上个世纪 70 年代, Muffler, Cataldi (1978) 早期的地热资源评价方法, 将地热资源的评价方法分为四大类: 地表热流量法、体积法、平面裂隙法、岩浆热量匡算法。80 年代开始, 随着计算机技术的广泛应用, 地热资源评价开始应用计算机进行模拟。由美国加利福尼亚大学 (Karster Pruss) 开发的 TOUGH2 是用于非饱和地下水及热运移计算的软件、LUMPFIT 是由冰岛国家能源署 (Gudni Axelsson 1985) 开发的地热资源集中参数模拟软件、ICEBOX 是由冰岛国家能源署 (Thrthur Arson, and Grimur Bjornsson, 1994) 开发的地热

模拟软件包，该软件包共有 30 多个软件，几乎涵盖了地热勘查开发的各个方面，主要由 LUMPFIT 集中参数模拟软件、VARFLOW、HOLA 地热井的压力温度分析软件、TR 地热井回灌示踪实验数据分析软件及 WATCH 地热水的水化学分析软件组成。

迄今世界上已有许多国家对其本土的地热资源进行了勘查评价。如：日本自 1957 年至 1977 年曾四次对本国的中低温热水资源和超深度高温热流体资源作了勘查评价；美国在 1975 年和 1978 年先后公布了“726”和“790”通报，详细介绍了美国地热资源评价成果，1982 年又公布了“892”通报，专门介绍低温地热资源评价报告。此外，法国、意大利、新西兰、冰岛及东欧一些国家都已对本国的地热资源作出评价。从各国的勘查评价方法来看，主要依据各自的地热资源类型、赋存条件及分布状况，选择适于本国情况的计算方法。

我国地热资源丰富而广布，并有悠久的利用历史。但地热能作为新能源加以开发利用起步较晚，地热资源的计算与评价及热储工程研究工作也仅处于探索阶段。

1984 年地矿部水文司，组织编制《地热资源评价方法》，次年由地矿部批准发布，作为地矿部标准（编号：DZ40-85）。国家“七五”科技攻关项目中第二十一项（农村可再生能源技术开发）第五课题是“地热利用技术”，第一专题为“地热资源评价及数据库建立”，第一子专题为“我国典型农业区地热资源评价”，以秦皇岛、天津山岭子地热田和宁晋、束鹿地热田为试点基地进行研究。

80 年代后期，由国家储委提出制订《地热资源地质勘察规范》，并指定国家矿产储量管理局、地矿部地质环境管理司组织编写。1989 年由国家技术监督局批准作为中华人民共和国国家标准发布（编号：GB11615-89）。上述“DZ40-85”和“GB11615-89”这两个标准的制订，为我国地热资源的勘查、评价，不仅提供了方法，而且有了统一的规范，对提高我国地热田勘查成果水平，无疑是有益的。

热储工程无论从理论还是方法实践上都有了很大的发展。随着热储工程研究的深入和与之相关学科的发展，作为地热资源管理的重要组成部分，中低温地热热储工程研究将在地热资源开发利用的决策中起着越来越重要的作用。国外热储工程理论研究多，但多数应用于高温地热系统，边界条件相对简单，问题单一。国内中低温地热热储工程理论系统研究较少，而目前我国地热资源利用实际问题多属于低温地热系统，边界条件复杂，不能较准确地描述各类问题，目前尚没有一套完整的具有实用性和可操作性的用于中低温低热热储的方法和理论。

## 5. 地热资源开发利用技术

### §5.1 地热资源可持续发展利用的关键技术

地热采灌平衡技术、热泵技术、低温供热工艺、地热资源梯级开发循环利用的集约化技术等。

#### (1) 应用回灌技术，实现采灌平衡

利用低温地热尾水进行原水回灌，采灌平衡，维持热储层压力，既可避免地热弃水、地表沉陷等环境污染和地质灾害，又可以将热储固体中的热量不断带出地面，有效地延长地热田的使用寿命。

#### (2) 应用热泵技术，提高资源利用率

热泵是一种仅消耗少量高品位能源(如电能等)，即可将低品位热能转换为较高品位热能的装置。热泵技术用于地热水供热系统中，可以在低温地热水中多次取热，使地热弃水温度降低到理想的程度，提高资源利用率，避免了对环境的热污染。同时，热泵可根据不同的热力系统，提供不同的供回水温度，满足不同热用户的温度要求，增大地热资源供热的适用范围。

#### (3) 低温采暖，降低地热尾水温度

低温地板辐射采暖室温均匀，舒适感好，美观卫生，适用性广，热效率高。在相同的舒适条件下，室内计算温度可比对流方式低  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，总耗热量可减少  $10\%\sim 30\%$ 。更重要的是可利用包括低温地热水在内的各种低焓能源。

#### (4) 梯级开发，循环利用工艺

地热水通过热交换器和热泵机组等进行换热后，最后回灌到地热回灌井中，梯次换热，原水回灌，降低尾水温度，实现采灌平衡。同时，用户热力系统按照采暖方式和供热参数，分别以换热器、热泵机组和调峰设备等为热源，进行优化组合，形成地热能转换后的梯次利用，使地热利用率和系统负荷能力大大提高。在初冬和末冬季节，仅以地热资源承担基础热负荷；在严冬季节，尖峰负荷出现时，启动调峰设备进行调峰。

### §5.2 地热发电技术及存在的技术难题

#### (1) 优势发电方式

地热发电的过程就是把地下热能首先转变为机械能，然后再把机械能转变为电能的过程，

原理和火力发电的基本原理是一样的.所不同的是,地热发电不像火力发电那样需要备有庞大的锅炉,也不需要消耗燃料,它所用的能源是地热能.

根据可利用地热资源的特点以及采用技术方案的不同,地热发电主要分为地热蒸汽、地下热水、联合循环和地下热岩 4 种方式.

## (2) 需要解决的重大技术难题

### ◆ 地热田的回灌

地热水中含有大量的有毒矿物质.例如我国羊八井的地热水中含有硫、汞、砷、氟等多种有害元素,地热发电后大量的热排水直接排放,会对环境产生恶劣影响.地热回灌是把经过利用的地热流体或其他水源,通过地热回灌井重新注回热储层段的方法.回灌不仅可以很好地解决地热废水问题,还可以改善或恢复热储的产热能力,保持热储的流体压力,维持地热田的开采条件.但回灌技术要求复杂,且成本高,至今未能大范围推广使用,如果不能有效解决回灌问题,将会影响地热电站的立项和发展.因此,地热回灌是亟需解决的关键问题.

对地热储回灌的可行性评价要考虑以下几个重要方面:①最优地点的选择;②钻井和井孔运行费用与其他排放方法费用之比较;③某一速率回灌所要求的压力,以及回灌量随时间的衰减等运行方面的问题.

### ◆ 地热田的腐蚀

地热流体中含有许多化学物质,其中主要的腐蚀介质有溶解氧( $O_2$ )、 $H^+$ 、 $Cl^-$ 、 $H_2S$ 、 $CO_2$ 、 $NH_3$  和  $SO_2$  等,再加上流体的温度、流速、压力等因素的影响,地热流体对各金属表面都会产生不同程度的影响,直接影响设备的使用寿命.地热电站腐蚀严重的部位多集中于负压系统,其次是汽封片、冷油器、阀门等.腐蚀速度最快的是射水泵叶轮、轴套和密封圈.

常见的防腐措施如下:①使用耐腐蚀的材料,采用不锈钢材质的设备及部件,但这种措施往往成本较高.②对腐蚀部件的金属表面涂敷防腐涂料,但涂层一旦划破,会加速金属材料的腐蚀.③采取相应的密封措施,防止空气中的氧进入系统.④针对不同类型的局部腐蚀采取相应的防腐措施,例如选材时应尽量避免异种金属相互接触,以避免电偶腐蚀.

### ◆ 地热田的结垢

由于地热水资源中矿物质含量比较高,在抽到地面做功的过程中,温度和压力会均发生很大的变化,进而影响到各种矿物质的溶解度,结果导致矿物质从水中析出产生沉淀结垢.如在井管内结垢,会影响地热流体的采量,加大管道内的流动阻力进而增加能耗;如换热表



面结垢,则会增加传热阻力;垢层不完整处还会造成垢下腐蚀。

常用的防止或清除结垢的措施有:①用 HCl 和 HF 等溶解水垢,为了防止酸液对管材的腐蚀必须加入缓蚀剂;②采用间接利用地热水的方式,在生产井的出水与机组的循环水之间加 1 个钛板换热器,可以有效防止做功部件腐蚀和结垢,但造价很高;③采用深水泵或潜水泵输送井中的流体,使其在系统中保持足够的压力,在流体上升过程和输送过程中不产生气化现象,从而防止碳酸钙沉积;④选择合适的材料涂衬在管壁内,以防止管壁上结垢。

#### ◆ (4) 地热电站设计标准的编制

国家建设部委托中国电力工程顾问集团公司西南电力设计院编制了国家标准《地热电站设计规范》(GB50227)。这部国家标准对地热电站的建设规模、站址选择、总体规划以及具体技术做了规划。

该《地热电站设计规范》主要适用于单机容量为 12MW 及以下新建、扩建和改建的地热电站的设计。

## §5.3 地热泵技术及存在的技术难题

### (1) 存在的优势

地源热泵(Ground source heat pump)也称为地热热泵(Geothermal heat pump),它是以地源能(土壤、地下水、地表水、低温地热水和尾水)作为热泵夏季制冷的冷却源、冬季采暖供热的低温热源,同时是实现采暖、制冷和生活用水的一种系统。它用来替代传统的用制冷机和锅炉进行空调、采暖和供热的模式,是改善城市大气环境和节约能源的一种有效途径,也是国内地源能利用的一个新发展方向。

### (2) 存在的问题

影响地源热泵推广应用的主要原因为:

- ◆ 土壤特性问题。地源热泵系统的性能好坏与当地土壤热特性密切相关,地热源的最佳间隔和深度取决于当地土壤的热物性和气候条件。土壤的热特性研究主要包括土壤的能量平衡、热工性能、土壤中的传热与传湿以及环境对土壤热物性的影响等。
- ◆ 地下换热器传热机理的理论研究繁多,但缺乏理论与实践的有效结合,缺乏多环境下应用技术的系统研究以及实际有效的强化传热方法。
- ◆ 不同冷、热负荷下,地下换热器与热泵系统最佳匹配技术的研究不够。
- ◆ 热泵技术与其它技术的配合问题:地源热泵技术是暖通空调技术与钻井技术相结合

的综合技术,两者缺一不可,这要求工程组织者和工程技术人员能够合理协调、做好充分的技术经济分析。

- ◆ 对环境的影响问题:目前地下水的回灌技术不完善,在一定程度上会影响以水为低位热源的地源热泵的进一步推广;此外土壤源热泵空调系统钻井对土壤热、湿及盐分迁移的影响研究有待进一步深入,如何使不利因素减少到最小是必须考虑的问题。

## §5.4 地热水回灌技术

### (1) 真空回灌

在地热回灌的过程中,如果采用自然回灌,回灌水将携带大量气泡。气泡随回灌水进入地层后。由于气体释放就会产生气相堵塞。另外由于回灌水中(特别是在以地表水为回灌水源时),水中营养物丰富,会造成渗滤层表面藻类细菌大量生长与繁殖,从而堵塞空隙,影响入渗效果。利用真空回灌可以有效控制气泡堵塞与微生物堵塞。

### (2) 压力回灌

加压回灌是指在采用加压泵加压的情况下将尾水注入回灌井进行回灌,回灌的难易程度与热储层的裂隙发育及地下热水运移通道的顺畅程度密切相关。因此,热储条件好、裂隙发育位于断裂带附近的回灌井进行回灌相对较容易,而热储条件差、裂隙小发育的回灌井进行回灌相对较困难。孔隙型回灌在回灌初期的回灌能力要稍强一些,而在后期的回灌能力稍差一些,故在初期条件允许情况下可采用自然回灌,而在后期要采用加压回灌。

### (3) 地热水回灌存在的技术难题

地热回灌是目前地热资源开发利用中日益突出的问题,它关系到一个地区的地热资源可否持续开发利用,也关系到开发的成本。沉积盆地型地热田从长远利用考虑,都必须进行回灌,实行采、灌结合,尽可能做到少消耗储层中的地热水量,通过回灌技术多采取储层中的热量,保持储层均衡稳定的热水头压力,实现资源的可持续利用。

回灌中的技术问题主要有二,一是回灌堵塞问题,二是回灌水在储层中的运移与热均衡问题。由于热储层储存的热量,远远大于回灌水比原水减少的热量,只要回灌井与开采井保持适当的间距,采、灌区的热平衡不会有多大的问题。所以,实际上地热回灌的主要技术问题是回灌堵塞问题。从北京、天津、西安、福州等地近年开展回灌的经验来看,岩溶裂隙和裂隙地层,回灌堵塞的问题并不突出,尤其是岩溶裂隙地层,基本上可以实行 1:1 的回灌;第四系、第三系孔隙热储,回灌的堵塞问题比较突出,一个回灌井的回灌量,仅能回灌开采

量的 40%左右，开采井与回灌井的比例是 1：2~1：2.5。从而加大了采、灌的成本。

## 6. 地源热泵技术

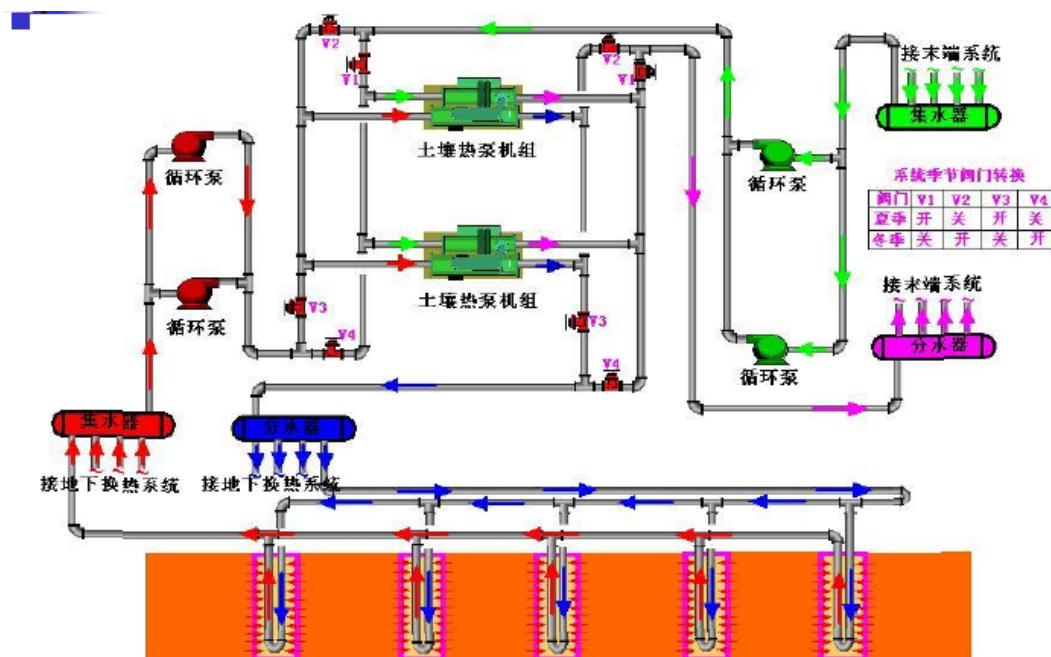


图 地源热泵系统流程图

相对常规的空调系统，地源热泵的独特之处在于利用大地作为系统的冷热源。针对热源系统，目前在连接的方式以及与其它冷热源的相互结合上有新的尝试。主要的应用技术方向包括以下几个方面：

### §6.1 直接膨胀(DX)热泵系统

针对住宅(别墅)建筑和小型商用建筑，越来越多的工程在采用直接膨胀方式，即使用金属埋管(一般为铜管)直接埋入地下，铜管内循环不再是一般的地源热泵系统中的流体，而是制冷剂。这种系统的优点是成孔直径小，施工成本较常规的垂直埋管低；减少一级换热器，系统效率高，减少了一级水泵，流体直接由压缩机驱动。另外一个优点是避免了使用防冻剂。对这种系统的顾虑主要集中在对环境保护以及系统的使用年限上。目前大部分北美热泵制造商均提供这种直接膨胀的 DX 热泵系统。

### §6.2 混合热源(Hybrid)系统

即采用地源和其它热源的混合方式。最主要的是地源和空气源的混合，这种混合方式运行的效率可以达到和完全埋管方式相当的水平，直接膨胀(DX)热泵系统埋管的规模是混合热源(Hybrid)系统的 1/3~1/2。初期投资显著降低，系统的经济性明显提高。美国联邦能源

管理委员会(FEMP)针对几个大型工程,分别使用了开式冷却塔,封闭式冷却塔和干式换热器作为空气源的能量交换设备,实际证明干式换热器的运行效果最好。在混合系统当中,合适的设计以及运行策略对系统的实际效率非常重要。其运行策略是通过室内需求,当时电价,室外空气温度以及地下循环温度的综合模型优化形成的。

### §6.3 垂直立井(Standing Column Well)系统

这种系统即不同于抽取地下水的开式系统,也不同于封闭的套管系统,而被认为是一种半开半闭系统。其原理是使用较大直径(一般为 5'~6')的套管,管壁上有预制的透孔。正常运行时,管内流量平衡,与外部浅表地下水没有明显的流量交换,但在高峰负荷时,循环模式改变,系统内的循环流体和系统外的地下水发生交换(Bleeding),高效带入或带出土壤中的能量。其系统寿命、可靠性、设备的免维护方面等均不如封闭式系统,但地下系统的投资可大幅度降低。

### §6.4 金属板式换热(Jim Slim)系统

用于住宅占地面积大,并且大量的房子临水(湖、河、溪)而建,因此一种平板式的金属(钛)换热器被用来直接沉放在水体里面,作为从浅表水中提取能量的装置,这种装置受专利保护,目前仅有 AWEB 一家在市场出售。这种方式受欢迎的原因在于其安装简便、成本低、运行效果好。

### §6.5 热泵和燃料电池(Fuel Cell)复合系统

以家庭能源系统和地源热泵的结合最具挑战性,其中策略之一是将氢电池(Fuel Cell)和地源热泵、太阳能结合形成一个独立的无外部能源供应,但可以提供电力照明、冷暖气的系统。非常适合远离电力生产的地区。

## 7. 地热发电技术

### §7.1 直接蒸汽发电法

直接蒸汽发电站主要用于高温蒸汽热田。高温蒸汽首先经过净化分离器,脱除井下带来的各种杂质后推动汽轮机做功,并使发电机发电。所用发电设备基本上同常规火电设备一样。直接蒸汽又分为两种系统:

#### (1) 背压式汽轮机循环系统

适用于超过 0.1 兆帕压力的干蒸汽田。发电方式最简单、投资费用较低、电站容量较小,例如意大利拉德瑞罗地热电站。

#### (2) 凝气式汽轮机循环系统

适用于低于 0.1 兆帕压力的蒸汽田,地热流体大多为汽水混合物。例如美国盖瑟斯地热电站和意大利拉德瑞罗地热电站。地热资源中,干蒸汽地热田数量较少,多数是湿蒸汽田和热水田。蒸汽中含有杂质并具有腐蚀性。

### §7.2 扩容(闪蒸式)发电法

该方式适合用于井口参数较高的湿蒸汽田和热水田。用 100℃ 以下的地下热水发电,是如何把地下热水转变为蒸汽来供汽轮机做功的呢?这就需要了解水在沸腾和蒸发时它的压力和温度之间的特有关系。大家知道,水的沸点和气压有关,在 101·325 kPa 下,水在 100℃ 沸腾。如果气压降低,水的沸点也相应地降低。50·663 kPa 时,水的沸点降到 81℃; 20·265 kPa 时,水的沸点为 60℃;而在 3·04 kPa 时,水在 24℃ 就沸腾。

根据水的沸点和压力之间的这种关系,我们就可以把 100℃ 以下的地下热水送入一个密闭的容器中抽气降压,使温度不太高的地下热水因气压降低而沸腾,变成蒸汽。由于热水降压蒸发的速度很快,是一种闪急蒸发过程,同时热水蒸发产生蒸汽时它的体积要迅速扩大,所以这个容器就叫做“闪蒸器”或“扩容器”。用这种方法来产生蒸汽的发电系统,叫做“闪蒸法地热发电系统”,或者叫做“扩容法地热发电系统”。它又可以分为单级闪蒸法发电系统、两级闪蒸法发电系统和全流法发电系统等。

两级闪蒸法发电系统,可比单级闪蒸法发电系统增加发电能力 15%~20%;全流法发电系统,可比单级闪蒸法和两级闪蒸法发电系统的单位净输出功率,分别提高 60%和 30%左右。采用闪蒸法的地热电站,基本上是沿火力发电厂的技术,即将地下热水送入减压设备——

扩容器,产生低压水蒸汽,导入汽轮机做功。因热水温度低于  $100^{\circ}\text{C}$  时,全热力系统处于负压状态。这种电站,设备简单,易于制造,可以采用混合式热交换器。缺点是,设备尺寸大,容易腐蚀结垢,热效率较低。由于系直接以地下热水蒸汽为工质,因而对于地下热水的温度、矿化度以及不凝气体含量等有较高的要求。这个过程很迅速,所以有形象的称为闪蒸过程。

扩容法地热电站设计的关键是确定扩容温度和冷凝温度,这两个参数直接影响发电量。为了增加每吨地热水的发电量,可以采用两级扩容以至三级扩容的方法。

### §7.3 中间介质（双循环式）发电法

地热双循环发电技术,又名中间介质地热发电法,与其他地热发电技术最大的区别在于使用两种流体作为发电系统的工质(其他地热发电技术通常是地热水蒸汽(或汽水混合物)直接或闪蒸进入发电系统做功转换为电能)。对于中低温地热资源,产生蒸汽的参数低,其做功能力不足等特点限制了地热发电的应用。而地热双循环发电系统,地热流体携热进入热交换器,将热传递给另一种工质(通常为低沸点工质),该种工质得热蒸发进入汽轮机做功。两者相比,后者更适合中低温地热源发电,且有避免地下水污染等优势。

现今使用的地热双循环发电技术,按照所应用的循环不同主要分为两类:

#### (1) 有机朗肯循环

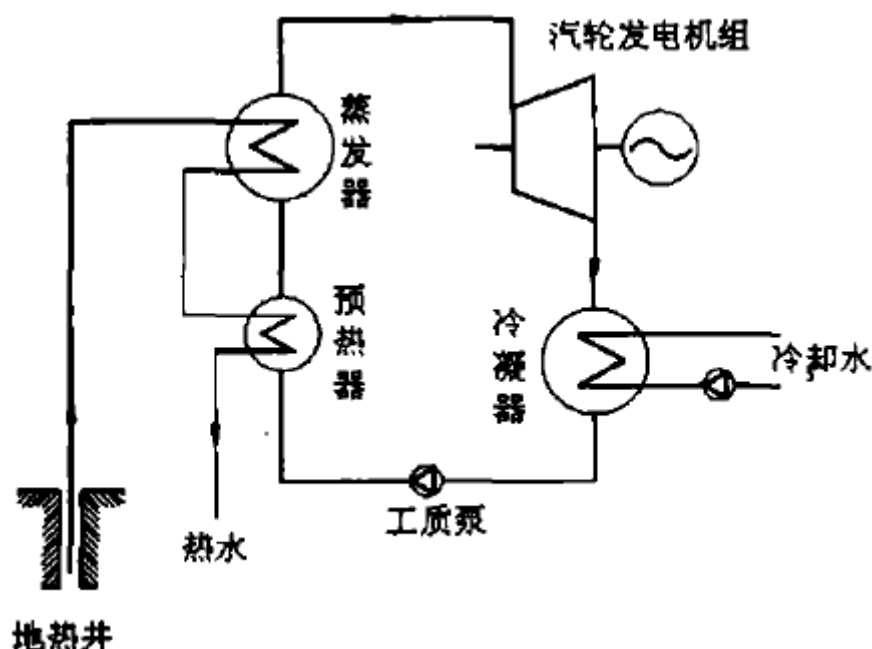


图 3 有机朗肯循环系统示意图

有机朗肯循环,示意图如图 3 所示,通常使用低沸点有机工质,如氟乙烷、正戊烷和异戊烷等,利用中低温地热流体与低沸点有机工质换热,使后者蒸发,产生具有较高压力的

蒸汽推动汽轮机做功发电。

## (2) 卡里纳循环技术

卡里纳循环技术是利用地热能使氨-水混合介质汽化、发电的技术。它是密闭循环的，进入冷凝器的剩余热量，或者通过冷却塔排放丢弃，或者在可能的情况下，进一步进行有限的利用。卡里纳循环技术已开发 20 多年，该技术其开发最初目的是用于各种工业源废热，如燃气轮机或其他燃烧工艺过程的废热。

循环介质氨和水，或其他单一组分的介质，在稳定的恒温下可以汽化和冷凝。但是，卡里纳循环技术的特点是采用氨-水混合物作循环介质，其蒸发是在一个大的温度范围内进行。这个特点就可能使其比单一组分的介质，更有效地利用热源的热焓，并使其发电效率比著名的有机兰金循环（ORC—Organic Rankin Cycle）提高 20%~40%。

氨的价格便宜，而且作为单一物质，或与水的混合物广泛地用于工业界。例如，用于吸收式致冷机。在这种致冷循环中，其温度范围相当类似于低温发电循环。其用于循环计算的部件，如换热器、泵和管道的热力学性能，都是大家熟知的。即使氨具有潜在的毒性，但处理这种物质，以及在氨循环操作方面，都积累了许多经验。而且，如果发生故，其环境影响也是可以忽略的。氨没有臭氧消耗功能，而且没有全球温室效应。采用卡里纳循环的发电装置，在安全管理方面的规程，类似于氨致冷机的应用管理。

来自热源的热水冷却到一定水平，将热能转移给工质使其蒸发。在与地热水（盐水）换热过程中，氨-水混合工质与地热水之间的平均温差，明显小于单一工质与地热水之间的平均温差，减少了换热过程的熵增加值，即工质从地热水中得到了更多的热能，这就是卡里纳循环发电效率较高的一个主要原因。



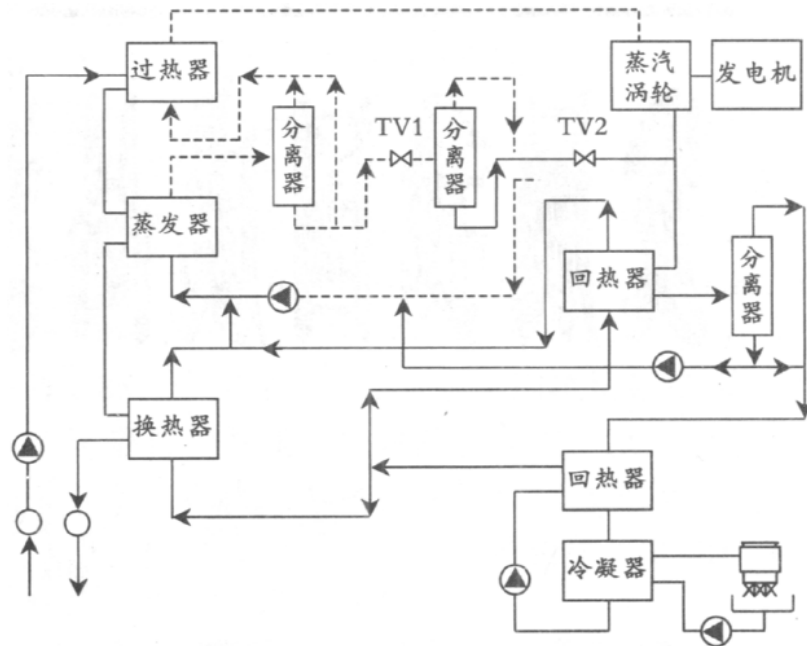


图4 卡里纳循环的深层岩体热能发电装置的工艺流程

卡里纳循环的发动机与其他热力发动机相比，具有设计简单、效率高（至少高 10%）等特点。这种新技术类似于只加热一种流体的兰金循环，将诸如燃气轮机的排气废热充分利用，将其导入一个二元蒸汽（70%的氨，30%的水）的蒸馏子系统。这个子系统产生 3 种另外的混合物。一种是 40/60 的混合物，可以依靠正常的冷却源完全冷凝。冷凝后，用泵使其达到较高压力，并与蒸馏过程产生的一股富气混合。产生 70/30 比例的工作介质，这种高压、完全冷凝的工作流体，重新进入蒸发器，以完成整个循环。在整个循环中，混合工质的组分都是变化的。这种工艺的优势包括，沸腾温度和冷凝温度的可变性，以及高水平的复原。

采用卡里纳循环的深层岩体热能发电装置的工艺流程（见图 4）是通过深层地热加热采出的热水与氨-水混合物换热，氨-水混合物作为循环工质带动汽轮机发电。最近，德国的 M+W Zander 公司按照这个技术路线设计了一套地热发电装置，装置的输出电功率达 5 MW。

采用卡里纳循环发电装置，其投资费用几乎类似于有机兰金循环装置，而且考虑到热能阶梯利用，可有较高的热能利用率等特点，装置的总体经济性将会更高。德国 M+W Zander 公司设计的卡里纳循环地热发电装置的发电成本，低于德国政府执行的长期（20 年）对可再生能源开发支持的保护电价 0.15 欧元/kW·h。总之，卡里纳循环与有机兰金循环相比其优点：一是拥有比较高的装置效率和热源效率；二是工质成本、运行与维护成本比较低，而具有较低的发电成本和单位电价；三是降低了污染物的排放风险。

采用常规技术，从低温热源，例如温度约为 150℃ 的热水，不能经济地生产电能。卡里

纳循环在利用低温热源提供较高水平发电性能方面，是一个技术上的突破。它以更高的装置效率，降低了发电成本，并减少了污染物的排放，是深层岩体热能发电必备的配套技术。

卡林纳循环利用吸收式制冷技术和回热技术，在设备成本投入上高于有机朗肯循环。

## §7.4 全流循环式发电法

全流循环式发电法针对汽水混合型热水而提出的一种新颖的热力循环系统。地热水进入全流膨胀机进行绝热膨胀，膨胀后汽水混合流体进入冷凝器冷凝成水，然后再由水泵将其抽出冷凝器而完成整个热力循环。

## §7.5 联合循环发电

联合循环地热发电系统就是把蒸汽发电和地热水发电 2 种系统合二为一，它最大的优点就是适用于高于  $150^{\circ}\text{C}$  的高温地热流体发电，经过一次发电后的流体，在不低于  $120^{\circ}\text{C}$  的工况下，再进入双工质发电系统，进行二次做功，充分利用了地热流体的热能，既提高了发电效率，又将经过一次发电后的排放尾水进行再利用，大大节约了资源。该机组目前已经在一些国家安装运行，经济效益和环境效益都很好。

该系统从生产井到发电，再到最后回灌到热储，整个过程都是在全封闭系统中运行的，因此，即使是矿化程度很高的热卤水也可以用来发电，且不存在对环境的污染。同时，由于系统是全封闭的，即使在地热电站中也没有刺鼻的硫化氢味道，因而是 100% 的环保型地热系统。这种地热发电系统采用 100% 的地热水回灌，从而延长了地热田的使用寿命。

## §7.6 干热岩发电

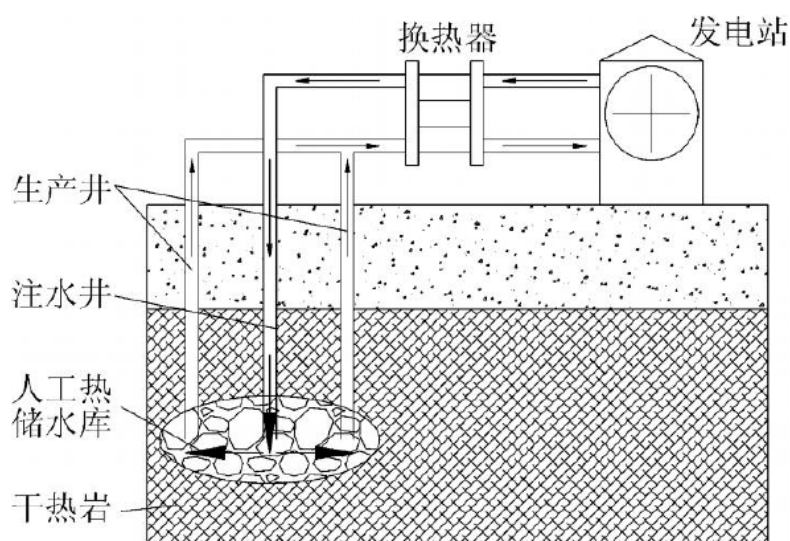


图 5 干热岩地热发电系统

利用干热岩发电与传统的热电站发电的区别主要是采热方式不同(图 5)。干热岩地热发电的流程为:注入井将低温水输入热储水库中,经过高温岩体加热后,在临界状态下以高温水、汽的形式通过生产井回收发电。发电后将冷却水排至注入井中,重新循环,反复利用。在此闭合回流系统中不排放废水、废物、废气,对环境没有影响。

天然的干热岩没有热储水库,需在岩体内部形成网裂缝,以使注入的冷水能够被干热岩体加热形成一定容量的人工热储水库。人工网裂缝热储水库可采用水压法、化学法或定向微爆法形成。其中,水压法应用最广,它是向注水井高压注入低温水,然后经过干热岩加热产生非常高的压力。在岩体致密无裂隙的情况下,高压水会使岩体在垂直最小地应力方向上产生许多裂缝。若岩体中本来就有少量天然节理,则高压水会先向天然节理中运移,形成更大的裂缝,其裂缝方向受地应力系统的影响。随着低温水的不断注入,裂缝持续增加、扩大,并相互连通,最终形成面状的人工热储水库,而其外围仍然保持原来的状态。由于人工热储水库在地面以下,可利用微震监测系统、化学示踪剂、声发射测量等方法监测,并反演出人工热储水库构造的空间三维分布。

从生产井提取到高温水、蒸汽等中间介质后,即可采用常规地热发电的方式发电,包括直接蒸汽法、扩容法以及中间介质法等。由于直接蒸汽法要求从井下取出高温蒸汽,效率较低,因此应用较少。扩容法是将生产井中的热水先输送至扩容器,通过减压扩容产生的蒸汽推动汽轮机发电。我国西藏羊八井地热电站即属扩容法地热发电。目前研究较多的是应用中间介质法地热发电,例如有机兰金循环和卡里纳循环等。蒸发器是中间介质法干热岩发电的关键设备,地热水通过蒸发器把低沸点物质加热,使其产生高压蒸汽并通过汽轮机发电,做完功的排气在冷凝器中被还原成液态低沸点物质。