

# 地 热 系 统

——原理和典型地热系统分析

地 质 出 版 社

# 地 热 系 统

——原理和典型地热系统分析

L.Rybach L.J.P.Muffler 编

北京大学地质学系地热研究室 译

地 质 出 版 社

## 内 容 简 介

地热系统是指地壳中的大地热流量富集程度足以构成能量资源的某些地域。本书以一些专章的形式概要地介绍对地热系统的现代认识。为了加深对这些认识的理解,本书还以另一些专章分析了在当今世界上的地热开发中有代表性的某几个地热系统的情况。原理部分包括地热系统中热量和质量的传递,热能量的提取,地热系统的地球物理和地球化学勘探,资源评价以及地热开发中的环境冲突等。本书的特点是只涉及地热能地质学、地球物理学、地球化学、水文学、数学模拟以及环境等地球科学学科领域,它适用于与能源科学有关的科研人员、大学教员以及高年级学生和研究生等。

Edited by

L. Ryback and L. J. P. Muffler

**GEOTHERMAL SYSTEMS**

**PRINCIPLES AND CASE HISTORIES**

John Wiley & Sons Ltd., 1981

Chichester·New York·Bresbane·Toronto

**地 热 系 统**

——原理和典型地热系统分析

北京大学地质学系地热研究室译 佟伟等校

责任编辑:佟伟

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张: 18<sup>3</sup>/<sub>8</sub> 字数: 420,000

1986年3月北京第一版·1986年3月北京第一次印刷

印数: 1—1,674册 定价: 4.35元

统一书号: 13038·新208

# 前 言

地热能是一种所谓的替代性能源，它目前的利用水平尚无法与传统能源（石油、天然气、煤、核能以及水力能）相匹敌，然而地壳里蕴藏着丰富的地热能。特别是在矿物燃料越来越贵和稀缺的今天，地热能在许多国家里都具有影响能源经济的潜力。尽管如此，地热能还不是特别引人注目的二十一世纪的希望，它需要大量投资并要求在物理学方面出现难以预料的突破性进展。即使这样，世界上地质背景不同的许多地区还是进行了地热能的示范性利用。

地球蕴藏着巨量热能，对这一论断是不存在异议的。绝大部分地热能都埋藏得太深，以致于人类无法汲取出来加以实际利用，对这一看法也没有多大争论。但即使把我们的注意力局限在地壳里（大体相当于地球外圈10到50公里之间），地热能量仍然是巨大的。当然不能把这种热能全部都看成是资源，正如我们不能把地壳里所含有的铝全部都当成资源的道理一样。但有关地热能的分布和富集，以及所能回收的份额的现实性假设说明，它至少可能成为一种重要的补充性能源，并且很可能成为一种主要的能源（参看 Armstead, 1978）。任何一种合理的假设都清楚地表明，世界地热资源的数量要远远超过现在利用的规模。

到目前为止，地热能利用的发展虽然缓慢，但却持续增长着。单从发电来看，直到七十年代中期每年仅增长7%，但最近几年，每年递增19%左右（见本书 Muffler 所写第6章的图1）。地热能直接利用（建筑物采暖，工艺供热以及农业利用等）的发展也显示了同样的情景。影响地热利用增长速率的主要因素显然是1973年的石油危机，以及由此产生的许多国家缩减或者取消石油进口的需要。这种需要对于没有本国石油蕴藏的发展中国家和小国更加尖锐。对于这类国家，地热能对其能源经济会产生重大的影响。例如萨尔瓦多1977年所消耗的电能中有32%来自1975和1976年装成的阿瓦查潘60兆瓦的地热电站（见本书 Cuéllar 的文章）。

地热能利用规模增长的同时对地热的理解程度也提高了。五十年代和六十年代是理解程度增长缓慢的两个十年。当时只有为数甚少的一些先行研究家，他们发展了水热对流系统的地质学、地球化学和水文学基本原理。地热田的典型经验极少。比较引人注目的只有拉德瑞罗、蒙特阿米阿塔、怀拉基和盖瑟尔斯。但到七十年代，无论是资料，还是研究工作，均出现爆炸性增长，其原因在很大程度上仍然是石油危机。随着勘探和开发的进展，典型经验也增加了，如布罗德兰兹，塞罗普列埃托以及美国加利福尼亚州英皮里尔谷等。另外，注意力也不再局限于水热对流系统，而是扩展到地压型热储、干热岩体，甚至岩浆等。

因此在兴趣和开发都急速增长的七十年代末期来总结我们对地热的理解是适宜的。本书试图以专题做为章节的形式提供这种总结，这些章节包括了地热研究中涉及的主要地球科学领域，并附有地热系统实例，以介绍世界范围现代地热的开发趋势。每个专章都由密切参与他们的某一特定课题发展研究工作的科学家们撰写，典型热田情况则分别由亲自参

徐世英

加或者密切了解该热田地热开发的人员撰写。另外，每个专章和典型热田介绍都从全局和专业的角度来通观地热能源的勘探和开发。

本书局限于地热能源的地球科学方面，包括地质学、地球物理学、地球化学、水文学、数学模拟以及环境冲突等方面。至于地热能源的工程、利用以及经济等方面的问题，读者可参看 Milora 和 Tester (1976) ,Wahl (1977) 以及 Armstead (1978) 等人的专著。

### 参 考 文 献

Armstead, H. C. H. , 1978, Geothermal Energy, E. & F. N. Spon, London, 357pp; Milora, S. L. , and Tester, J. W. , 1976, Geothermal Energy as a Source of Electric power, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 186pp; Wahl, E. F. , 1977, Geothermal Energy Utilization: John Wiley, New York, 302pp.

Ladislaus Rybach  
L. J. Patrick Muffler

# 译者序

世界上的当今地热事业发展有两个趋势，有地热资源潜力的第三世界国家侧重发展地热的实用方面，希望通过开发利用地热来解决本国的能源问题，其中佼佼者如菲律宾，她的地热发电的装机容量在短短的十几年内已经猛跃至世界第二位，仅次于美国，萨尔瓦多的地热电力在1977年已经占到当年全国电力供应总量的32%；意大利、新西兰以及美国等地热事业先驱者至今仍然强调地热开发利用的示范和研究方面，他们虽然也在开发利用水热型地热资源，但是希望通过干热岩体的示范性研究来彻底敲开地球这个庞大的热库的大门，希望有朝一日能用太阳能和地热等新能源取代或者部分取代传统能源，以缓解或解决传统能源百多年来的大规模利用所造成的严重环境冲突。这两种趋势的迅猛发展构成了今日地热事业的蓬勃兴旺局面，本书就是这种局面下的地热地球科学研究成果的总结。

本书由七个国家的二十一位专家写成。它只涉及地热能源的地球科学方面，前七章为基本原理，后五章为典型地热系统分析。原理部分从地热系统的严格定义和科学分类出发，介绍地热系统的特征，热量的传导传递和区域热流，地热异常带及其板块构造格局；由于当今世界上已经得到开发的地热系统全是水热系统，因此本书又用较多的篇幅介绍热量和质量的对流传递，水热对流系统的数学模拟以及管状和对流环等各式各样的模型，这些模型尽管不可避免地带有某些猜测性质，但它毕竟可以对热田的地下温度以及可能采收的能量等做出某些预测。在地热资源勘探和热水的地球化学两个专章中，作者没有重复介绍一般习用方法的本身，而是把评述的侧重点放在一般方法在地热应用中的特殊性和问题上。第五章的内容为我国的地热专业人员展现了一个新的领域，即热田的能量和质量的提取过程以及热田在这一过程中的可能反应，作者根据多年的观测资料和深入细致的分析，提出了许多新颖而又引人入胜的见解。第六章是关于地热资源评价的原则和方法的概要性评述，这些原则和方法目前虽然只有少数几个国家在推行，但它几乎已被国际地热学界所公认，因此为了做好我国的地热资源评价工作，并使评价结果能够和国际上的同类工作进行对比，认真琢磨本书第六章的原则和方法显然是必要的。另外，当今传统能源的利用之所以引起争论，主要原因即在于它产生了不容置疑的重大环境冲突。地热的开发也存在环境问题。要想使地热取得代用能源的地位，就必须解决地热利用中的环境问题，本书的第七章就是这方面研究成果的良好评述。本书的后五章介绍了五个典型地热系统的情况，内容包括从低焓资源到高焓资源，直接利用和动力应用，水热和干热，采收和回灌，以及如何通过定向钻进最大限度地减少对地面的影响等。

本书虽然只涉及地热能源的地球科学方面，但是由于地球科学本身的博大宏深，相关学科甚多，加之来自七个国家的二十一位作者的英文写作风格又很不一致，使得译者在译校过程中经常处于确切表达原意和如何使中译本读者顺利读懂的矛盾之中。中译本肯定会存在不少缺点和错误，我们热诚欢迎读者予以指正。

本书的译校者是：前言和第七章王新运，第一第二章佟伟，第三章于洸，第四和第六章张知非，第五章过帼颖和佟伟，第八和第九章廖志杰，第十章朱梅湘，第十一章沈敏

子，第十二章刘时彬。第一、二章由王仁教授校对，其余各章由佟伟校对。另外，我们将各个章的参考文献移至书后，编成参考文献总目。

在本书的西班牙文、冰岛文和日文地名的译名上，曾分别得到北京大学西语系沈石岩、外交部西欧司王树桐以及北京钢铁研究设计总院吴音等同志的鼎力相助，阎学文同志帮助清抄译稿，我们谨此表示深切的感谢。

北京大学地质学系地热研究室

一九八四年七月

# 目 录

前言  
译者序

## 原理部分

<b>1. 地热系统, 传导热流和地热异常带 L. Rybach</b> .....	1
1.1. 地热系统的定义和分类.....	1
1.2. 地热系统的地球物理和地球化学特征.....	3
1.2.1. 与浅成侵入体相关的对流型水热系统.....	3
1.2.2. 区域热流量高至正常地区的大气水环流系统.....	4
1.2.3. 高孔隙率地质环境中的低温 (<150°C) 含水层.....	5
1.2.4. 干热岩体.....	6
1.3. 传导传热和区域热流.....	7
1.3.1. 基本原理.....	7
1.3.2. 热源.....	9
1.3.3. 传导热流.....	12
1.3.4. 岩体的热能含量和地热资源底数.....	18
1.4. 地热异常及其板块构造背景.....	19
1.4.1. 扩张脊.....	21
1.4.2. 大陆裂谷.....	22
1.4.3. 聚敛边缘 (消减带).....	23
1.4.4. 板内热异常.....	24
<b>2. 水热系统中热量和质量的对流传递 S. K. Garg和D. R. Kassoy</b> .....	26
2.1. 水热系统的数学模拟.....	26
2.1.1. 碎裂介质中的质量和能量传输.....	27
2.1.2. 通过多孔介质的流体流的平衡定律.....	28
2.1.3. Boussinesq 近似.....	30
2.2. 热量和质量理想化对流传输.....	31
2.2.1. 无量纲的方程和参变量.....	31
2.2.2. 理想化模拟.....	33
2.3. 能够自圆其说的地热储模型.....	39
2.3.1. 管状模型.....	39



2.3.2. 大尺度的对流环模型	40
2.3.3. 热泉群和断层带	42
2.3.4. 控制地热储补给的断层带	44
2.4. 水热系统的生产前模型	46
2.4.1. 长谷破火山口	47
2.4.2. 索尔顿湖地热储	49
2.4.3. 怀拉基地热田	52
<b>3. 地热资源勘探 J. T. Lumb</b>	<b>57</b>
3.1. 引言	57
3.2. 勘探战略	58
3.3. 水文学方面	59
3.4. 勘探方法	60
3.4.1. 文献调查和初步研究	61
3.4.2. 地质学和水文学以及矿物学研究	61
3.4.3. 地球化学(包括同位素化学)	62
3.4.4. 地球物理方法	66
3.4.5. 勘探钻进	76
3.5. 模拟	78
<b>4. 水地球化学在地热勘探和热储工程中的应用 R. O. Fournier</b>	<b>79</b>
4.1. 引言	79
4.2. 水热反应	79
4.3. 热储温度的估算	82
4.3.1. 二氧化硅地热温标	82
4.3.2. Na/K 地热温标	86
4.3.3. Na-K-Ca 地热温标	87
4.3.4. $\Delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O})$ 地热温标	88
4.4. 热水与冷水的地下混合	89
4.4.1. 混合水的识别	89
4.4.2. 二氧化硅的混合模型	90
4.5. 地下沸腾效应	91
4.5.1. 沸腾导致的浓度变化的计算	91
4.5.2. 热储温度的焓-氯化物图解估算法	91
4.5.3. 沸腾对地球化学温标的影响	93
4.6. 与热水系统对比的蒸汽为主系统	93
4.7. 井与泉热水的比较	99

4.8. 热储工程中的应用	101
4.8.1. 井孔中含水层温度的早期预测	101
4.8.2. 生产井温度变化的监测	101
4.8.3. 不同温度多层含水层生产的确认	102
4.8.4. 热储内部的闪蒸	102
4.8.5. 系统内部其它部位存在较高温度的证据	103
4.8.6. 压力下降的地球化学证据	104
4.9. 摘要	104
<b>5. 地热储热能量的提取 I. G. Donaldson和 M. A. Grant</b>	<b>105</b>
5.1. 引言	105
5.1.1. 某些背景情况	106
5.2. 理想化系统	108
5.2.1. 简单的基本模型	108
5.2.2. 单相(热水)热储	109
5.2.3. 两相系统	111
5.3. 某些典型现存地热田的热量提取	115
5.3.1. 温水储	115
5.3.2. 热水储	117
5.3.3. 两相系统	123
5.3.4. 以蒸汽为主的系统	126
5.4. 其它系统	127
5.4.1. 地压系统	128
5.4.2. 干热岩体系统	128
5.4.3. 岩浆囊	128
5.5. 摘要	129
<b>6. 地热资源评价 L. J. P. Muffler</b>	<b>131</b>
6.1. 引言	131
6.2. 资源术语	131
6.3. 地热资源术语	134
6.4. 地热资源评价方法	134
6.5. 最近的地热资源评价选例	136
6.5.1. 意大利托斯卡纳的中部和南部	136
6.5.2. 新西兰	137
6.5.3. 美国1975年的地热资源评价	137
6.5.4. 美国1978年的地热资源评价	139

6.6. 不确定性和需要研究的课题	141
6.6.1. 尚待发现的水热对流系统	141
6.6.2. 水热对流系统地热能量的采收	142
6.6.3. 与火成活动相关的地热能的评价	142
6.6.4. 地压地热流体能量的采收	143
6.6.5. 低温地热资源的资产编目	143
<b>7. 地热开发的环境问题 M. D. Crittenden, Jr.</b>	<b>144</b>
7.1. 引言	144
7.2. 环境意识的演变	144
7.3. 空气质量	146
7.4. 水的质量	148
7.5. 滑坡	150
7.6. 地震活动	152
7.6.1. 区域地震活动	153
7.6.2. 地面开裂	153
7.6.3. 诱发的地震活动	153
7.7. 地面沉降	156
7.8. 结论	157

## 典型地热系统分析

<b>8. 匈牙利潘诺宁盆地的低焓地热资源 P. Ottlik, J. Gálfi, F. Horváth, K. Korim 和 L. Stegena</b>	<b>159</b>
8.1. 引言	159
8.2. 地质概况	160
8.2.1. 地质总貌	161
8.2.2. 构造活动与火山活动	165
8.3. 地热	165
8.3.1. 岩体温度测量	165
8.3.2. 热流量测量	166
8.4. 水文地质情况	169
8.4.1. 水迁移系统	170
8.4.2. 水化学特征	171
8.5. 地热能的回收和利用	173
8.5.1. 热水利用的主要部门	174

8.5.2. 热水井的运行问题	176
8.5.3. 潘诺宁盆地存在高焓热储的可能性	176
<b>9. 日本泷上地热区的勘探与开发H. Nakamura 和 k. Sumi</b>	<b>177</b>
9.1. 引言	177
9.2. 地质概况	179
9.2.1. 八幡平火山区的一般地质情况	179
9.2.2. 泷上地热区及其周围的地质情况	181
9.3. 勘探史	181
9.3.1. 与日本地质调查所(GS)的合作研究	181
9.3.2. 日本金属和化学药品公司(JMC)的勘探工作	185
9.4. 生产特性	189
9.4.1. 地热蒸汽的生产	189
9.4.2. 热水的回灌	189
9.4.3. 井孔和热储的试验	191
9.4.4. 回灌试验	192
9.4.5. 蒸汽供应系统	193
9.5. 效率与经济性	194
9.6. 未来的发展	196
<b>10. 冰岛东北部的克拉夫拉地热田V. Stefánsson</b>	<b>197</b>
10.1. 引言	197
10.2. 地质背景	198
10.3. 热田勘探史和热田模型	203
10.3.1. 地表勘探	203
10.3.2. 地下勘探	206
10.3.3. 热田模型	208
10.4. 热田的生产特性	208
10.4.1. 上地热层	208
10.4.2. 下地热层	212
10.4.3. 上下层间的相互作用	212
10.4.4. 岩浆活动对热储的影响	213
10.5. 利用经验	214
10.6. 目前和将来的发展	215
<b>11. 新墨西哥州赫梅斯山脉的地热系统及其勘探A. W. Laughlin</b>	<b>216</b>
11.1 引言	216
11.2 赫梅斯山脉的区域地质和地球物理背景	218

11.3 赫梅斯山脉的地质地球物理和水文情况	221
11.4 赫梅斯山区的地热勘探	223
11.4.1. 高温水热资源勘探	224
11.4.2. 干热岩体地热的开采方法	225
11.4.3. 干热岩体勘探	225
11.4.4. 低中温水热系统的勘探	232
11.5. 赫梅斯山区的地热系统	234
<b>12. 萨尔瓦多阿瓦查潘地热田的开采和回灌联合系统G. Cuéllar, M. Choussy</b>	
<b>和D. Escobar</b>	236
12.1. 引言	236
12.2. 地质背景	236
12.3. 水文地质情况	238
12.3.1. 浅含水层	238
12.3.2. 饱和含水层	239
12.3.3. 含盐含水层	239
12.4. 阿瓦查潘井孔的特征	239
12.5. 回灌计划	240
12.5.1. 回灌井的井身结构	241
12.5.2. 回灌井的接收能力	241
12.5.3. 灌入与采出的质量	241
12.5.4. 回灌控制	242
12.6. 回灌-采出的数量效应	243
12.6.1. 压力	243
12.6.2. 温度	244
12.7. 结论	247
<b>参考文献总目</b>	248

# 1. 地热系统，传导热流和 地热异常带

Ladislaus Rybach<sup>1)</sup>

## 1.1. 地热系统的定义和分类

地热系统可以按照它们的地质、水文和热量传递的特点下定义和进行分类。术语“地热”是指地球的内部热能。一般来说，地热的富集程度足以构成能量资源的系统才能叫做地热系统。

地壳热能量的绝大部分都储存在一些大型岩体之内，因此必须有某种工作流体（水，蒸汽）将分散的热能量聚集、运移并在适宜的环境下以形成地热储的方式富集起来（关于资源和地热储的详细讨论请参看本书Muffler的文章）。使工作流体发生运动的驱动力与下行的冷补给水和在浮力作用下向地表上行的地下热水之间的密度差有关。

地热储中热能量的富集程度可以通过上部10公里以内地壳岩体的平均热能含量（85千焦/公斤，取地表温度为基准温度）与饱和蒸汽焓（2790千焦/公斤，236℃和3.2兆帕）的比较来说明，因此在高能位地热资源中，可提取流体的富集因数大体等于30。地热能的富集除了要求热储岩体要有很大的孔隙率（蓄存系数）以外，还要求它要有很高的渗透率（水力传导率）。

地热系统内热能量富集（相对毗邻地物而言）的特征是出现正的地热异常。在形成地热异常的过程中，地质和水文因素以及热量传递现象都会起重要作用，如地壳浅部的年青岩浆热源，大气水在断层或破裂系统内部的水热环流以及热量传导传递的不规则变化等，后者如所涉及的岩类的热导率和（或者）放射性蜕变热产率有所不同，以及从深部地壳上来并通过该岩体的区域热流量的差别（参看 Muffler 等，1980）等。最重要的地热异常则和上行的岩浆有关。

焓或温度、渗透率分布以及热储埋深因地而异等因素的不同组合使得各个地热系统之间存在千差万别。有些地方有可能存在天然的水热环流运动，这个过程包括到达深部的大气补给水从深部热岩体中吸取热量，然后向地表上升，而地表大气水又经常向深部提供补给，因此工作流体是系统本身提供的。另一种极端情况是在有限范围内的人工循环环路，如人造干热岩体吸热系统，其工作流体不得不由人工提供（关于干热岩体系统的详细讨论请参看本书内Laughlin的文章）。处于上述二者之间的是经常出现在热流量正常区域内沉积岩层之中面积巨大的厚含水层。人们能够把这些含水层里的水开采出来（在大多数情况

---

1) Institute of Geophysics, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Switzerland

下可能必须用泵才能够采出来) 并直接利用其中的地热能, 然后再排掉或回灌到地下。

地热系统可以根据其地质环境和热量传递方式分成以下几个大类(参看 Muffler, 1976a) :

(i) 对流型地热系统

(a) 与浅成年青酸性侵入活动有关并出现在具有高孔隙率和渗透率的地质环境中的水热系统;

(b) 出现在区域热流量高至正常区域以内的低孔隙率-破碎带渗透率环境中的环流系统;

(ii) 传导型地热系统

(a) 存在于热流量正常或略高于正常的区域以内的高孔隙率和渗透率沉积层(包括地压带)中的低温低焓含水层;

(b) 高温低渗透率环境中的干热岩体系统。

对流型地热系统以工作流体的天然环流为特征, 因此绝大部分热量不是依靠传导而是通过循环流体传递的。对流过程总是趋于使循环系统上部的温度增加, 下部的温度下降(关于对流传热的详细讨论请参看本书内Garg和Kassoy的文章)。

迄今已经进行实质性开发并用于商业性电力生产的所有地热系统实际上都属于与浅成年青酸性侵入体有关并存在于高孔隙率和高渗透率地质环境中的水热系统。这些高孔隙率和高渗透率热储必然埋藏在钻孔能够采及的深度(小于3公里)上, 热储岩体的高渗透率使大量地热流体的进流和采出成为可能。

浅成年青岩浆侵入体代表了热源。这种侵入体主要出现在特殊的地质环境(参看1.4节)中, 如扩张洋脊, 会聚板块边缘, 大陆裂谷以及板内熔融异常区等。上地壳里的长时期热异常很可能是岩浆引起的, 这种岩浆的成份属酸性, 而不是玄武岩质岩浆(参看Smith和Shaw, 1975以及本章1.4节), 因为玄武岩岩浆会很快地上升到地表, 它的热量业已在火山产物的冷却过程中消散掉了, 而酸性岩浆由于有较高的粘度而很可能在上地壳内驻留下来, 驻留下来的岩浆体在相当长的时间(几百万年; 老侵入体将冷却到围岩温度, 因而不再能维持一个水热系统。参看1.3.2节和图1.5)内起热源的作用。但在某些情况下, 浅埋的玄武岩岩浆囊在开发水热系统方面也能够有相当大的地热资源潜力(参见本书Stefánsson的文章)。

一般认为这类水热系统可以根据其加热和散热的平衡分成两个亚类, 即以蒸汽为主的水热系统(如美国加利福尼亚的盖瑟尔斯和意大利的拉德瑞罗, 参见图1.13)和更常见的以液态水为主的水热系统(如新西兰的怀拉基和布罗德兰兹, 美国加利福尼亚的英皮里尔谷等)。一般说来在这两类水热系统的热储当中, 绝大多数都在某种程度上既有液态水又有蒸汽, 两者的差别只对利用有实际的重要意义。热水和蒸汽为主系统的生产特性将由Donaldson和Grant进行详细的讨论(见本书)。每一系统的地热流体(水和蒸汽)都有自己的特征性化学组成(Ellis和Mahon, 1977)。

缺少年青火成侵入体的地区也能够发育环流系统, 这种系统可以由大气降水在传导区域热流热机制下的深循环过程产生。形成这种系统的先决条件是存在具有足以使水发生循环的渗透率的断层或破碎带。水所达到的温度主要取决于区域热流量的大小和水环流所及的深度。如果所有其它条件一样, 则在比较高的传导热流量地区的较浅部位将出现较高

的温度。区域热流量分区问题将在 1.3.3 节里详细讨论。

遍布全世界的众多温泉和热泉就是这类循环系统的实例。产生热泉的地质背景和围岩类型各式各样，围岩的一般特征是原生孔隙率和渗透率低。热泉排放区的范围绝大多数都有限，通常仅在断层或破碎系统的交汇处或其附近出露，补给区的面积要比排放区的大几个量级。热水在循环系统里的驻留时间能够达到 $10^2$ — $10^3$ 年。

传导型地热系统的特点是它的热状态仅仅来自热传导，而且通常是稳态的过程。工作流体或者是天然存在（即沉积盆地深含层中的流体）的，或者必须由人工提供（干热岩体系统，参见 1.2.4 节）。对流循环因温度差小而受阻；在干热岩体系统的情形下，则因渗透率低而受阻。

深沉积盆地的特点是存在埋深不等的广大含水层，这种含水层存在于具有高孔隙率和渗透率的沉积层之中。含水层的温度通常低于 $150^{\circ}\text{C}$ （亦即低焓），并且可能含有古老的封存孔隙水（一般具有高盐度）或者可能由毗邻的高地得到补给。如果某一含水层有自流压力条件，则一旦钻及热储，地下热水就会自由地流到地表（参见本书中 Ottlik 等人的文章）。含水层的生产能力可以用所谓传送率（渗透率与含水层厚度的乘积）的大小来表示。

地压型热储是沉积含水层的一个特例，其中孔隙流体所承受的压力超过水柱重量所形成的压力（后者等于静水压力）。事实上，孔隙流体承受了相当大一部分上覆岩层的总负荷（即岩层静压力）。典型孔隙压力值大体等于 100 兆帕。地压型热储的顶部和底部为不透水和低热导率的页岩所圈闭。它和“正常”沉积区域的差别在于，正常沉积区的孔隙水（及其中所含有的热量）在成岩挤压过程中会被驱赶出来，地压带则不会，它的行为有如某些“热阱”。

地压带的典型实例是美国墨西哥湾北部的岸上岸外地压系统。地压型热储出现在地下 3 至 7 公里的深度范围以内，同时还含有大量天然气（参看 Wallace 等，1979）。

下一节我们将集中讨论上述主要地热系统类型的地球物理和地球化学特征。除了第 128 页 5.4.1 一小节以外，本书对地压型地热资源将不再作进一步的论述。

## 1.2. 地热系统的地球物理和地球化学特征

### 1.2.1. 与浅成侵入体相关的对流型水热系统

在地表上，这类系统常常以喷汽孔和沸泉等形式显示出来。这类系统勘探的主要目标是确定它的位置，并勾画出其范围。另一目标则是确定热储中的优势温度。

钻孔的温度测井结果表明这类系统的地热梯度能够接近 $200^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ ，说明在不透水的盖层中传导传热过程是主要的（参看 1.3.3.2 节）。低温度梯度（或者甚至是负梯度）地区可能标志渗入带，即冷大气降水渗进深部并补给水热系统的地带。发生这种地热梯度变化的水平尺度是水热系统侧向延伸范围的指示。

重力制图能够给出与浅部年青酸性侵入体相关的对流型水热系统位置的另一个标志。高孔隙率热储岩体里的蒸汽部分以及热膨胀引起的密度下降，都可以使水热系统出现负重力异常（与邻区相比）。虽然在蒸汽为主的盖瑟尔斯地热田之上会有较大的负重力异常，但因自封闭而硅化等若干因素有可能掩盖负异常，甚至能够导致对流型水热系统之上出现



正重力异常（详见本书Lumb的文章）。

尽管含盐度和孔隙率等因素对所测岩石的电阻率的影响比温度影响更加突出，电法对于圈定对流型水热系统仍然具有重大的潜力。火山岩区岩层的含盐度相当低，所以电法测量可以直接用于确定火山环境里地热储的位置并勾画出其分布范围来（参见本书 Nakamura和Sumi, Stefánsson的文章，更详细的讨论请参看本书Lumb的文章）。

在多数情况下，浅成侵入体本身的位置可以通过观测远震P波延迟或震波衰减等天然地震方法圈定出来。在美国黄石公园、长谷破火山口以及盖瑟尔斯-克利尔湖地区都曾经测到过P波延迟现象（Iyer, 1975; Iyer等, 1978）。在适宜的情况下，热异常体的垂向延伸范围也能够被确定出来。

如果给定情况能够满足一系列的假设条件，则建立在自流热泉（或冷泉）和钻孔水样化学组分基础上的化学地热温标可以用来估算热储温度（详见本书Fournier的文章）。异常高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值是存在地幔和（或）深地壳源流体供给的指示。

### 1.2.2. 区域热流量高至正常地区的大气水环流系统

这类地热系统的特点是热泉排放区出现在断层或破碎带，特别爱出现在断层或破碎带与地形低相遇的地方。这类系统的补给也多沿断层带进行。水热环流系统由高至正常的区域热流支撑；环流系统的寿命大体在 $10^4$ — $10^5$ 年（参看Lachenbruch和Sass, 1977）。

高区域热流地区的环流系统表现出某些特殊的总体地壳背景。高热流往往来自地壳基部的一些不规则热过程。例如美国西部大部分地壳内都存在来自下面的镁铁质热岩浆侵入体，这些侵入体都是在过去2000万年期间发生的张性构造活动断裂地壳的产物（参见第1.4节）。

这类区域具有一系列地质的和地球物理的特点，如平均高程低，从而出现高布格重力异常、高热流量、地壳薄、 $P_n$ 波速度（紧邻壳幔界面之下的压缩波速）低、深部电导率高以及居里等温面埋深浅等（Diment, 1980）。

在某些情况下，无热泉一类地表显示的隐伏高温地热系统可以通过传导热流量制图的方法勾画出来（例如：美国蒙大拿马里斯维尔的情况请参阅Blackwell和Morgan, 1976；关于美国内华达德塞尔特峰的情况请参看Benoit, 1978）。但是这种系统的普遍特点仍然是存在明显的对流传热。传导热流分量可以通过热泉的流量进行估定：单位体积深部水热含量（ $Q_v$ ，焦耳/立方米）的增量等于

$$Q_v = \rho_f(T_r) [h(T_r) - h(T_s)] \quad (1.1)$$

式中 $\rho_f(T_r)$ 是流体在热储温度等于 $T_r$ 时的密度， $h(T_r)$ 和 $h(T_s)$ 分别为热储温度和地表温度下的流体焓。对流热流分量（毫瓦/平方米）等于

$$q_{\text{对流}} = \frac{Q_v \dot{d}}{A} \quad (1.2)$$

式中 $\dot{d}$ 是泉水总流量（升/秒）， $A$ 是排放区的面积。Sorey和Lewis（1976）以及Iriyama和Ōki（1978）都给出过计算实例（并请参看本书内Laughlin的文章）。

如同上述，断层或破碎带（地震活动使它经常保持张开状态，参阅Jaffé等，1976）为这些地热系统提供了环流通道。因此基岩破碎带是具有吸引力的勘探目标。勘探工作方面可以采用详细的构造地质填图以及遥感技术（适宜情况下可以采用热红外成象技术）等方