



当代石油和石化工业技术普及读本

地 热

中国石油和石化工程研究会 组织编写

刘金侠 袁 清 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

当代石油和石化工业技术普及读本

地 热

刘金侠 袁 清 编著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地热/刘金侠,袁清编著. —北京:中国石化出版社,2014.1
(当代石油和石化工业技术普及读本)
ISBN 978-7-5114-2561-4

I. ①地… II. ①刘… ②袁… III. ①地热能—普及读物 IV. ①TK521-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309691 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,
或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

850 × 1168 毫米 32 开本 4.75 印张 84 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

定价:15.00 元

前 言

工业革命后，能源成为了世界发展的直接动力。1973 年爆发的第一次世界石油危机，使石油价格暴涨，严重影响了能源消费，导致了世界性的经济衰退，显示了能源安全对国家发展的重要性。21 世纪以来，环境逐渐成为人类的主要关注领域之一。然而，已经形成的前所未有的能源需求规模 and 传统能源造成的污染，给人类社会的生存与发展提出了严峻的挑战。

中国人口众多，能源相对不足，且目前正处于工业化、城镇化加快发展的重要阶段，能源资源的消耗强度大，能源供需矛盾越来越突出。于是，大力开发可再生能源是化解能源危机、增强国家能源安全、应对全球气候变化、实现经济社会可持续发展的必由之路。人们不得不寻找新的途径来缓解这些问题。因此，规模巨大、分布广泛、可持续利用且清洁环保的地热资源成为了时代之需。

地热是一种地球内部储存的热能，由地核向地表传递释放，在地壳尤其是近地表的一些构造条件较好的地区形成资源富集。根据不同的资源类型，匹配以经济高效的开发技术，地热可被用于发电、供暖、种植、养殖、医疗等。

为了推进对地热资源的认识，本书从地热基础知识、地热资源分类、地热资源的勘查、评价与利用、实

际案例等方面出发，进行了简要介绍，与各行各业人员探讨交流。

因水平有限，如有疏漏不妥之处，请多多包涵，并欢迎批评指正。

目 录

第一章 地热概述	(1)
一、地热简介	(1)
二、地热在地球内部的分布	(2)
三、地热的运移与观测	(4)
四、地热开发相关概念	(7)
五、地热资源的应用	(26)
第二章 浅层地热能利用技术	(29)
一、中国浅层地热能的利用方向	(30)
二、浅层地热能利用技术体系	(30)
三、技术要点	(33)
第三章 常规地热资源分布规律	(39)
一、全球地热分布规律	(39)
二、中国地热资源分布规律	(48)
第四章 常规地热资源勘查与评价	(57)
一、地热勘查的工作内容	(57)
二、地热勘查的工作阶段	(59)
三、地热勘查的工作步骤	(63)
四、不同类型地热田勘查重点	(76)
五、地热资源评价	(78)

第五章 常规地热供暖技术与应用	(87)
一、地热供暖技术简介	(87)
二、地热供暖关键技术	(91)
三、国际地热直接利用情况	(104)
四、雄县地热供暖案例	(106)
五、咸阳地热供暖案例	(113)
第六章 地热发电技术与应用现状	(120)
一、地热发电技术简介	(120)
二、地热发电的技术难题	(124)
三、国际地热发电发展情况	(126)
四、国内地热发电典型案例	(129)
五、国外地热发电典型案例	(135)
第七章 干热岩开发技术前瞻	(138)
参考文献	(142)

第一章 地热概述

一、地热简介

地热是一种地球内部储存的热能，并作为一个伴生的资源，与地球的演变息息相关、形影相随。关于地球起源和演化，众说纷纭，但每种观点都在描述其热演化史。一种观点认为地球原始状态就是热的，因热能不断流失，外表冷却成硬壳，但内部还是高温且部分为熔融状态。另外一种观点认为原始地球与其他行星一样，温度较低，并没有分层结构，但由于后续陨石物质的不断摩擦轰击、放射性衰变放热和球体重力收缩挤压，使地球温度逐渐增加，并演变成如今外冷内热的结构。上述两个观点均认可了地热在地球演变过程中与岩石相互影响、相互作用、相互演变的历史。

目前，多数人倾向于冷起源说，认为 45 ~ 47 亿年前，原始地球已经开始形成。在形成过程中，由于星际物质撞击生热和重力压密的位能转化成热能，使其内部平均温度在 1000℃ 左右。原始地球形成后，放射性元素衰变热开始起着越来越大的作用。地球内部的放射性同位素 U、Th、⁴⁰K 蜕变产生的热能随着时间而积累，有

助于具有球体内部岩石熔融的形成，因此，原始地球内部的温度继续快速上升。在地球生成 5 亿年后，即在 40 ~ 42 亿年前，达到了铁质熔融点，而开始原始地球的分异过程。铁熔融后，不断向地心集中。在原始地球分异过程中，熔融的铁向地心集中，逐步形成铁、镍地核；较轻的元素硅、铝、氧向地表富集，形成原始地壳；剩下的铁、镁、硅酸盐构成地幔。时至今日，地球内热仍然是推动整个地球发展的内在动力，也是目前流行的“板块漂移”学说的主要支撑。整个地球的发展史在一定程度上也可以说是一部地球的热发展史。

可以看到，地热具有庞大的资源规模和广泛的分布，具有良好的研究和开发前景。李四光：“地球是一个大热库”，就形象地描述了地球这一热球的特征。据估算，储存于地球内部的热量约为全球煤炭储量 1.7 亿倍的热当量，每年从地球内部经地表散失的热量相当于 1000 亿桶石油的热当量。

因其成因和形式等特征，加以科学合理的开发方式，地热资源可定义为可再生能源矿产，是一种取之不尽、用之不竭的清洁性能源。

二、地热在地球内部的分布

这种来自地球内部熔岩的能量，是存储于地球内部的一种巨大能源，并以热力形式存在，是引致火山爆发及地震的能量。地热分布与地球结构密切相关。地球的

内部构造根据莫霍面和古登堡面划分为地壳、地幔和地核三个主要的圈层。

地球的中心为地核，研究认为：地核中心温度最高，应能达到 4500°C (图 1 - 1)。在地幔与地核交界的古登堡面，温度约为 3700°C 。地幔越靠近地壳，温度逐渐降低。整个地壳的平均厚度约 17 千米，这与地球平均半径 6371 千米相比，仅是薄薄的一层。但就是这薄薄的地壳却是地球内部热源的主要保温层，避免了高温热流大规模散失。地壳表面约

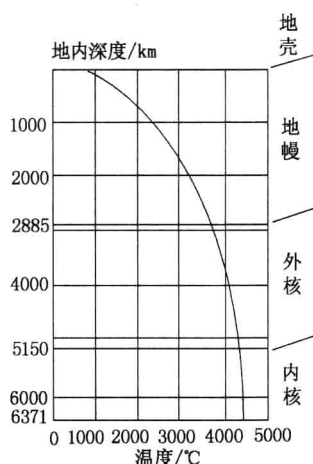


图 1 - 1 地球内部温度分布

14°C ，底部则高于 1000°C ，这体现了地壳的保温效果，减缓地幔等内部圈层温度降低，同时使地热能源源不断地向地表输送。但细水长流，延续了亿万年的热能供应，使地表涌现了壮观的温泉、火山喷发等地热现象。

由于热具有从高温向低温传播的性质，所以地球内部的高温热能以对流、传导和辐射等方式向地表传播并散失到外部空间。据估算，这种热释放出来的量约为 1.4×10^{21} 焦/年，且在一直持续。

蕴藏的丰富热能在温度差的驱动下主要通过岩浆活动、地层热传导，或者通过断层、裂隙等空间中的热液（以水为主）介质向地表流动、散失，形成了当前的地

层热场，即地温场。地温场的分布是热能活动带动物质活动的结果。我们要开发地热，就要全面分析地温场的特征，以获取地热能的来源、影响因素等重要信息。

温度向深处递增的速率称为地温梯度。在陆地，一般从地表向下平均每下降 100 米，温度就升高 3°C ，地温梯度记为 $3.00^{\circ}\text{C}/100$ 米。但在地热异常区，温度随深度增加会升高得更快，地热资源条件相对较好。

三、地热的运移与观测

地球内部地心的温度超过 4500°C ，以传导、对流等模式传播到埋深 100 千米的上地幔顶部时，温度已降至 $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。熔岩或高温地层将上覆的地下水加热，这些被加热的水会通过岩层裂隙与更浅的冷水进行长距离、大规模对流，进而形成了浅表热流涌出地面或者储存在地下岩土层孔隙裂隙中，为人类经济所利用。

在采取合理开发利用方式的前提下，地热资源将是一种取之不尽、用之不竭的清洁可再生能源，同时其矿产成分还被广泛利用在医疗、旅游及化工资源等行业。

地热这种广泛分布和形式独特的能源，主要表现为近地表的热能异常高于周边地区，而一个地区的地层温度（简称“地温”）状况是该区地质构造条件和地质历史的综合反映。地温分布受多种因素控制和影响。其中，区域地质构造和深部地壳结构对地温高低及其分布形态起主要控制作用；地温分布的影响因素主要

有岩石热物性、地下水活动和岩浆活动等。岩浆活动对现今地温场的影响取决于岩浆的活动时代、岩浆体的规模、几何形态、性质和活动方式。据有限元模拟结果，除第四纪以来的岩浆侵入体，一般认为其对地温分布的影响不大。

不同岩石的热导率对地温梯度有直接的影响，热导率高则传热快，温度在岩石中损失较小，地温梯度表现偏低，意味着此岩层可作为良好的热流通道，也具有形成热储的优势条件。一般来说，相对致密且有规模较大导水通道的碳酸岩、花岗岩、石英岩等岩石热导率较高，是勘查热储或通道的主要目标。粉细砂、黏土、泥岩、页岩等较疏松且导水性较差的岩土层，热导率偏低，是分析热储盖层的主要目标。基于这些特性，我们在地热资源勘查方面形成了如下认识：热流易于向热导率高的岩层传递，在热导率低的岩层下聚集。

在地热水的研究和开发中，热储温度是一项重要参数，在地热系统成因类型划分、地热资源潜力评价、热水循环和水岩相互作用等方面是不可或缺的。对于水热系统，常可采用钻孔测温直接获得深部区域地温信息，或根据热水化学组成应用地热温度计方法进行预测；而对于钻孔较少的水热型热储，或干热岩系统，则可基于地质条件，结合钻孔和岩石热物性参数通过地温场模拟进行预测。

地球内部的热能通过岩石和地下水向较冷的地表不断传递，最后散失到大气中。一般用单位时间内通

过地球表面单位面积的热流值来度量其规模，这也是地球内热在地表唯一可以直接量测的物理量，是判断地壳中地热异常区是否存在的重要手段之一。其温度测试工作一般在符合测试条件的钻井中进行，测量地层温度随埋深的变化情况。钻孔测温借助于测量井液温度获得地下岩石的温度，是研究区域温度场最直接的方法。由于在钻探过程中，天然温度场受到破坏，只有在钻探终止，井液循环停止一定时间之后，才逐渐恢复。钻孔温度经过恢复与井液（围岩）温度达到平衡之后，所进行的测温称为稳态测温，能够反映实际的地温情况。同时采集相应的地层岩性段的岩石样品，在实验室测定岩石热导率。结合温度变化和岩石特性，对大地热流进行综合计算。热流值的分布是深部地壳结构，包括地壳厚度、软流层埋深、高导层分布及壳内物质运动状态的反应。

全球大地热流测试工作在最初阶段进展比较缓慢，到了1955年总共的数据总量还不到100个。1960年后，随着对地热资源的关注和测量手段的改进，大地热流测试工作有了飞速的发展，截至1993年年底全球的热流数据达到了24774个，且正在以每年新增至少500个的速度推进。测量的结果表明：全球热流分布极不均匀，大地热流值主要分布在 $0.6 \sim 3.0 \text{ HFU}$ 范围内，平均值是 1.47 HFU 。大陆地区大地热流值一般为 60 毫瓦/平方米 ，超过 $80 \sim 100 \text{ 毫瓦/平方米}$ 便被作为明显的地热异常，可作为资源开发利用的研究区域。

小知识：大地热流

大地热流有两种表达方式，其专业单位为“HFU”，即“Heat Flow Unit”，其换算关系为

$$1\text{HFU} = 41.86 \text{ 毫瓦/平方米}$$

近地表地层地温构成：

地球表层的热能除了来自大地热流以外，还接收太阳辐射。大量钻孔资料表明，地表以下 15 ~ 30 米的范围内温度随昼夜及四季气温的变化而发生明显的变化，超过这一深度往下，太阳辐射的影响显著减小，地热流的影响成为主角，地层温度一般呈现随深度的增加而增长的现象。

四、地热开发相关概念

1. 地热资源概念

大家已经了解到地热是地球的一种内在热能，在深部和浅表均有分布。但对于利用来说，并不是所有的地热都能称之为资源。根据中华人民共和国国家标准《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)定义，地热资源是指能够经济地被人类所利用的地热内部的地热能、地热流体及其有用组分。而广义的地热资源包括：①地热过程的全部产物，主要指天然蒸汽、热水和热卤水等；②由人工引入地热储的水、气或其他流体所产生的二次蒸汽和其他气体、热水、热卤水等；③由上述产物带出的副产品(指价值比较高的矿物质)。

地热资源是一种可再生的资源，具有清洁、环保、利用系数高等特点。目前，人类的开发技术，实施经济开发利用的地热资源以埋深小于 5000 米的地热储层中的地热流体为主，包括天然出露的温泉，通过热泵技术开采利用的浅层地热能，通过人工钻井直接开采利用的地热流体以及干热岩体中的地热能，用途主要包括地热发电、地热供暖、洗浴、保健、矿物提取等。根据 Palmerini 估计，距离地球表面 5000m 深、15℃ 以上的岩石和流体的总含热量约为 14×10^{25} 焦，相当于 4778×10^{12} 吨标准煤的热量。

中国将传统的地热资源的温度下限定为 25℃，但借助于热泵技术，可将地热资源的概念进一步扩大。中华人民共和国地质矿产行业标准《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T 0225—2009) 将低于 25℃ 且埋深小于 200 米的岩土体、地下水和地表水中具有开发利用价值的热能称作浅层地热能。利用热泵技术，可将浅层地热能作为冷却或加热的源，为人类提供供热和制冷服务。这是人类科技不断进步而实现的技术革命。

因此，人们主要研究的地热资源，是赋存在地球浅表的地层中蕴含的地热，是具有较强的聚集规模的地热，更是能经济开发利用的地热。

2 地热资源的成因

地热资源的成因按照地质构造可分为三类：岩浆活动型、隆起断裂型和沉降盆地型。地热资源按照它在地下的储存形式可以分为四大类型：浅层地热能、水热型

资源、干热岩资源和岩浆资源。目前世界上开发利用的以浅层地热能和水热型地热资源为主。其中水热型地热资源按照温度分级可分为高温地热资源(温度大于 150°C)，中温地热资源($90 \sim 150^{\circ}\text{C}$)和低温地热资源(温度小于 90°C)。通常所说的地热能是指距离地表面5000米以内的热能。后者的概念范围要比前者要广，以下分别对这两个概念做一简要的介绍。

地热资源量虽大，但因分散，能够直接利用的地区有限。只有在地球内热相对富集地区如近代火山活动、构造活动强烈地区并达到为人类能够开发利用程度的这种地热，才构成具有一定规模和开发前景的地热资源。地热资源富集的地方，就有其独特的显示方式，我们称之为地热异常。

3. 地热资源的表现

由于各地区地热源、导热通道、地层的热导性能和透水性能的不同，致使大地热流呈现出明显的非均匀性特征，将地球表面热能分配划分为地热正常和地热异常两种差异显著的区域。正常区占地球表面的90%以上，其热流密度值变化范围是 $30 \sim 80$ 毫瓦/平方米，平均值大约等于60毫瓦/平方米，在地表以下1千米深度范围内，垂向地温梯度小于 $3^{\circ}\text{C}/100$ 米。异常区指地表热流量显著高于地球热流平均值的地区，该区热流密度平均值可能达到 41.8×10^2 毫瓦/平方米，最高可达 41.8×10^5 毫瓦/平方米，垂向地温梯度在1米距离外就可能出现变化。我国规定地温梯度超过 $3.5^{\circ}\text{C}/100$ 米即视为地热异常。异

常区面积外就可能为几平方千米，热流量的水平变化多呈突变形式。许多常见矿产，如石油、天然气，某些金属矿，盐丘及地热资源等都与地热异常有密切的成因联系，因此地热异常可成为寻找这些有用矿产的标志。

地热异常是地壳深部热流在上移过程中相对集中，并在地表或近地表所形成的异常现象。通常表现形式包括地表异常、地温异常、热流值异常、物理异常、化学异常、地震异常、岩浆及火山活动异常等。

1) 地表异常

地温和热流值异常是地热异常区存在的最直接标志，因而在地热普查阶段首先要进行地温测量，并测定和计算区域热流值，圈定异常范围。大地热流值基本上不受各类岩石热导率的影响，较地温梯度值更能全面地反映各地区的热状况，因此通过热流测量不仅可以了解深部地质构造地球物理条件及深部地层的地质特征，而且能够有效地圈定地热异常区，为地下热能勘探开发提供依据。地温异常在地表的表现形式极为普遍，其中下列现象最为常见：喷气孔、冒气地面、沸喷泉、沸泥塘、沸泉、温泉、热泉、热水河、热水湖、热水塘、热水沼泽、放热地面、水热蚀变、水热爆炸等。

(1) 喷气孔：除火山口以外，凡能喷出气体和蒸汽的孔洞均称为喷气孔，这是高温地热田存在的重要标志之一。喷气孔是火山活动后期或衰落阶段的特征性现象，因而也叫火山喷气孔，喷出温度可从 1000°C 到低于 100°C 。高温火山喷气孔气体含有大量氯化氢、氟化