

地 热 能 源 手 册

[美] L.M.Edwards 等著

耿俊峰 译

刘广志 校

地 质 出 版 社

地热能源手册

[美] L.M. Edwards 等著

陈松峰 译

王昕志 校

责任编辑：李顺

地质出版社

(北京·四)

蔚县印务厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本：880×1168¹/₃₂ 印张：18 字数：470,000
1987年12月北京第一版·1987年12月蔚县第一次印刷

印数：1—1,805册 国内定价：5.10元

统一书号：13038·新424

译 序

地热能，作为一种新型的替代能源，在能源匮乏的今天，愈来愈受到人们的重视。目前世界各国，包括我国，都投入了一定的力量积极进行地热勘探和开发工作。随着地热研究工作的深入，国外有关地热理论的专著不断增加，我国科技工作者亦有所介绍。然而，目前还尚未有一部从地热工程角度出发全面论述地热勘探与开发各个环节的工具书，《地热能源手册》便是这样一部实用性专著。

《地热能源手册》由美国十余位科学家和工程师撰写，他们分别是各自专业领域内的著名学者。这部手册不仅论述全面，内容为其他著作所鲜见，而且含有大量图表、公式，相信对于我国地热工作者将有一定的参考价值。

《地热能源手册》所涉内容十分广泛，这便不可避免地给翻译工作带来一定的困难。幸而译者在翻译过程中得到了诸多专家学者的指教。其中，地质矿产部探矿工程装备工业公司刘广志总工程师不顾年高体弱，抱病为本书译稿逐句进行了审校；地质出版社李顺昌高级工程师为本书责任编辑，对书中大量公式逐一演算，对文字精心推敲，并对原书错误之处作了订正；武汉地质学院北京研究生部蔡柏林副教授对本书有关章节作了审校。此外，武汉地质学院鲁连仲同志、地质矿产部地质技术经济研究中心唐尧镛、李颖同志对书中若干内容作了审阅，提出了详尽的修改意见。他们的指导对于提高本书翻译质量起到了相当重要的作用。本书翻译过程中还得到了刘俊英、陈慧嘉、肖慧平、胡明、张功冠等同志的帮助，谨致诚挚的谢意。

自然，限于译者水平，本书不可避免地还会存在谬误之处，敬请读者赐教。

耿俊峰

目 录

第一章 绪言	(1)
一、介绍	(1)
二、地热能资源的类型	(1)
(一) 水热型	(2)
(二) 热液成岩体型	(4)
(三) 导热控制型	(5)
三、地热基础资源的计算	(7)
(一) 温度梯度和地热资源	(7)
四、地热资源的地质学	(13)
五、地热能的勘探	(18)
六、地热钻探与成井	(18)
七、套管与管材设计基本原理	(20)
八、地热井的水泥固井	(20)
九、地层评价	(20)
十、热储工程的基本概念	(25)
十一、地热能经济学	(40)
十二、换算表	(40)
第二章 全世界地热资源	(53)
一、概述	(53)
(一) 资源类型	(55)
(二) 基础资源的数量	(59)
(三) 总结	(62)
(四) 途径	(63)
二、前期估价	(64)
(一) 描述性评价	(64)
(二) 电力研究所的调查	(65)

(三) 地区性和全国性评价.....	(66)
三、定义与分类法	(66)
(一) 地热储的类型.....	(66)
(二) 储量和资源定义与讨论.....	(68)
四、全世界基础资源估算	(74)
(一) 全球热含量.....	(74)
(二) 借用全球热流数据的基础资源.....	(76)
(三) 地热地区.....	(80)
(四) 基础资源与其他能源资源的比较.....	(81)
(五) 地区与国家的基础资源估算.....	(83)
(六) 美国的地热资源评价.....	(85)
(七) 意大利地热资源评价.....	(93)
五、储量和资源的估算	(97)
(一) 电力生产	(97)
(二) 目前的电力生产	(97)
(三) 直接利用	(101)
(四) 已钻探的热田和区域评价	(102)
(五) 热储试验、模拟、规模估算的局限	(113)
六、现状与发展	(113)
(一) 全世界的发展和计划.....	(113)
(二) 北美洲.....	(114)
(三) 中美洲和南美洲.....	(125)
(四) 大洋洲.....	(129)
(五) 欧洲	(138)
(六) 非洲	(150)
(七) 亚洲与中东	(153)
七、未来的前景.....	(155)
(一) 近期规划	(156)
(二) 长远规划	(160)
八、附录A 用于地热资源的区域评价定义	(163)
九、附录B 储量和资源的定义	(167)
十、附录C 经过计算的世界范围的地热	(168)

基础资源	(168)
十一、附录D 表2-12和2-15的参考文献 (略)	(173)
第三章 地热系统的地质学	(174)
一、介绍	(174)
二、年轻火山岩地区	(176)
(一) 来源于大型富硅质岩浆体的热	(176)
(二) 富硅质岩浆体的形状和大小	(179)
(三) 大型富硅质岩浆体与上覆火山田的关系	(180)
(四) 大型富硅质岩浆体的热历史	(185)
(五) 大型富硅质岩浆体的地理位置	(188)
(六) 构造组合关系不定的大型富硅质岩浆体	(191)
(七) 中性到富硅质成份的较小岩浆体	(193)
(八) 安山岩复火山的地理分布	(195)
(九) 玄武岩火山活动为主地区的地热资源	(199)
(十) 与大陆裂谷有关的地热地区	(203)
三、构造活动地区的地热资源	(204)
四、地压型地热资源	(205)
五、放射性成因的低温地热资源	(206)
六、附录E 普通火成岩的分类	(206)
第四章 地热能的勘探	(209)
一、介绍	(209)
二、渗泉和泉化渗泉	(210)
三、用于勘探的地质技术	(211)
(一) 文献收集	(211)
(二) 填图	(211)
(三) 岩石学	(212)
(四) 裂隙研究	(212)
四、用于勘探的地球化学技术	(213)
(一) 化学地热温标	(213)
(二) 痕量元素调查	(214)
(三) 地质年代学	(215)
(四) 水文学调查	(218)

五、用于地热勘探的地球物理技术	(219)
(一) 重力测量	(219)
(二) 航磁测量	(220)
(三) 热流	(221)
(四) 地电磁技术	(223)
六、地热勘探中的地震方法	(228)
第五章 地热井的钻进与成井	(231)
一、介绍	(231)
二、钻探设备与附属设备	(231)
三、套管设计	(233)
(一) “爆裂”负荷	(233)
(二) 挤扁(挤毁)负荷	(236)
(三) 螺纹的类型	(236)
(四) 热膨胀产生的各种应力	(237)
四、注水泥与套管	(237)
五、钻头	(238)
六、消声器系统	(241)
七、钻井液	(244)
(一) 地热井的钻井液问题	(244)
(二) 地热井使用的钻井液系统	(248)
(三) 实例回顾	(250)
(四) 结论	(251)
第六章 套管与管材设计的基本原理	(252)
一、介绍	(252)
二、地热井成井技术	(253)
(一) 裸眼完井	(254)
(二) 衬管完井	(254)
(三) 射孔套管完井	(255)
三、套管设计程序	(259)
四、套管柱的设计程序	(263)
(一) 导管	(264)

(二) 表层套管	(264)
(三) 中间套管	(268)
(四) 生产套管	(278)
五、热应力设计	(280)
(一) 热对套管和出气(水)管的影响	(280)
(二) 特殊应用	(288)
(三) 出气(水)管	(289)
(四) 密封	(290)
六、防喷器	(292)
七、水泥固井	(294)
第七章 地热井的水泥固井	(297)
一、介绍	(297)
二、井身设计	(297)
三、套管完全注水泥的重要性	(298)
四、固井水泥的组分	(300)
五、水泥搅拌法	(303)
六、材料管理	(305)
七、水泥灌注到位技术	(307)
八、总结	(311)
第八章 地层评价	(312)
一、地热井测井的目的	(312)
二、地球物理测井	(317)
三、地下压力的原理	(332)
(一) 通过测井确定地层压力	(336)
(二) 碎屑状超压环境中烃的分布	(338)
四、地层温度	(340)
(一) 蒸汽质量	(350)
五、地层水矿化度	(352)
(一) 矿化度原理	(362)
(二) 地层水矿化度和甲烷含量	(365)
六、地热测井分析	(369)

(一) 碎屑状和碳酸岩储热岩石的解释原理	(369)
(二) 在火成岩和变质岩中的解释原理	(381)
七、岩石的弹性	(406)
第九章 热储工程基本原理	(411)
一、概述	(411)
二、地热系统的类型	(412)
(一) 地热井的压力瞬变分析	(417)
(二) 蒸汽井的瞬变压力分析	(421)
(三) 热水井的瞬变压力分析	(426)
(四) 地热储的干扰试验	(433)
(五) 两相流的压力瞬变分析	(436)
(六) 现代试井分析	(438)
三、地热储的模拟	(441)
(一) Whiting和Ramey模型 (1969)	(442)
(二) Brigham和Morrow模型 (1977)	(445)
(三) 其他零维模型	(447)
(四) 地热储的数字模拟	(447)
(五) 结论	(450)
第十章 能的转换和地热能的经济问题	(454)
一、概述与本章范围	(454)
二、能的转换及利用	(458)
(一) 地面系统的应用和结构	(458)
(二) 热力学准则	(472)
(三) 工程设计标准	(479)
三、热电站循环的性能	(494)
四、经济分析方法	(507)
(一) 供应(成本)因素	(507)
(二) 需求(收入)因素	(509)
(三) 政府的限制和介入	(510)
(四) 费用模式	(512)
五、勘探、钻井和热储开发费用	(519)
(一) 勘探与土地获取费用	(521)

(二) 钻井与完井费用	(521)
(三) 流体聚集和分配系统的费用	(527)
六、地面转换设备费用	(528)
(一) 换热设备	(528)
(二) 泵	(531)
(三) 汽轮机和发电机	(533)
七、电力生产的经济学	(536)
(一) 与资源有关的影响作用	(536)
(二) 与热储工况有关的影响作用	(538)
(三) 与发电厂运转特性有关的影响作用	(544)
(四) 与财政有关的影响作用	(547)
(五) 实例研究	(548)
八、非发电性热生产的经济性	(550)
(一) 实例研究	(551)
九、商业可行性问题及展望	(552)
(一) 重要的问题	(553)
(二) 与传统的能源供应比较	(554)
(三) 世界开发：现状与未来	(556)
十、附录F：费用上涨估算技术	(559)

第一章 绪 言

一、介 绍

本书涉及到地热能源的地质与工程两大部分的各个方面。它的范围包括：

1. 地热系统的性质与地热地质的现代知识。
2. 为发现地热能源，工业界所使用的勘探技术。
3. 对设计和采用钻探、完井、人工激发热储等问题进行讨论。
4. 对热储性能进行估价和评价。
5. 确定热储中可回采的地热能源的经济价值。

二、地热能源系统的类型

尽管目前地热能源尚未被人们广泛理解，但却已经显示出新的重要性。地热能是一种旧概念，就最广泛的意义来说，它是地球的天然热能。Leibowitz在1978年为地热能一词下了定义。他认为，地热能是封闭在地球中距地表足够近的距离内，并可被经济开采的天然热能。不幸的是，绝大多数情况下，地热能分散在地壳浅部，难以经济回采。只有在热能富集在有限的体积内，就象碳氢化合物或矿物矿床一样的富集时，地热能才具备经济上的潜力。七十五年以前，意大利便开始把地热能转换为电力；在新西兰，这项工作也已开展了三十年；而在美国加利福尼亚州距旧金山以北六十英里处的盖瑟斯（Geysers），商业生产是从1960年才开始的。

人们所观察到的地温梯度以及对地球浅部地壳的岩石所进行的热导率的测量证实，地热热流在全世界范围内，都是相对恒定的（Jones, 1970）。在构造稳定区域，热流值或地温梯度值不会发生明显变化。而在构造活动区域，热流值的变化幅度则很大。这些数值不是异常高，便是异常低。热流值持续高的构造活动区域的一种类型便是位于构造板块的边界。现代火山作用和造山运动地区正处于这些大板块的边缘（图1-1）。地壳内的裂隙系统能把板块相互作用所产生的热能输送到地球表面，或输送到近地表处。

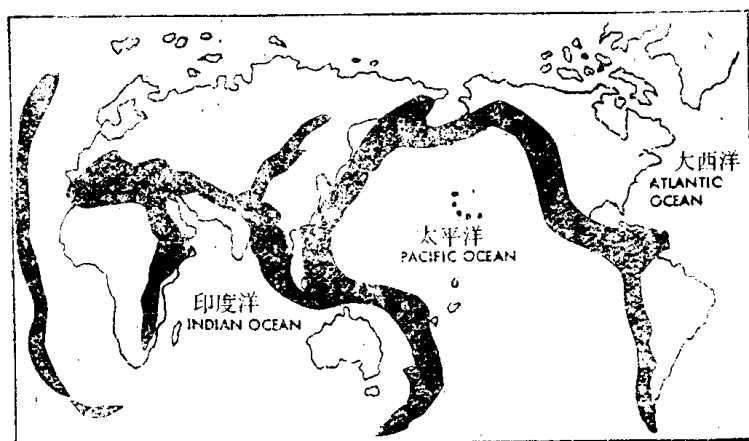


图 1-1 世界地热区域，其分布与现代火山作用和地壳板块边界一致

（根据Leibowitz, 1978, 承Energy Source许可）

地热能源系统有三种主要类型：热火成岩体型（*hot-igneous*），导热控制型（*conduction-dominated*）和水热型（*hydrothermal*）。尽管前两种系统可能包括了绝大部分的可利用热能，但是，要想从商业角度利用这些储存着的热能，还需要进一步发展开采技术。所以，目前水热型地热能源系统处于优先考虑的位置。

（一）水热型

这一类型是由储存在多孔和渗透性储热岩石中的高温水和（或）蒸汽构成的。由于水和（或）蒸汽通过断层和裂隙的对

流循环，热能被传递到地球表面附近。其动力是由向下运动的冷水和向上运动的热液之间的密度差所产生的重力。地热储热岩石中的热能是通过把热水和(或)蒸汽带到地表的方式进行开采的。

(见图1-2)

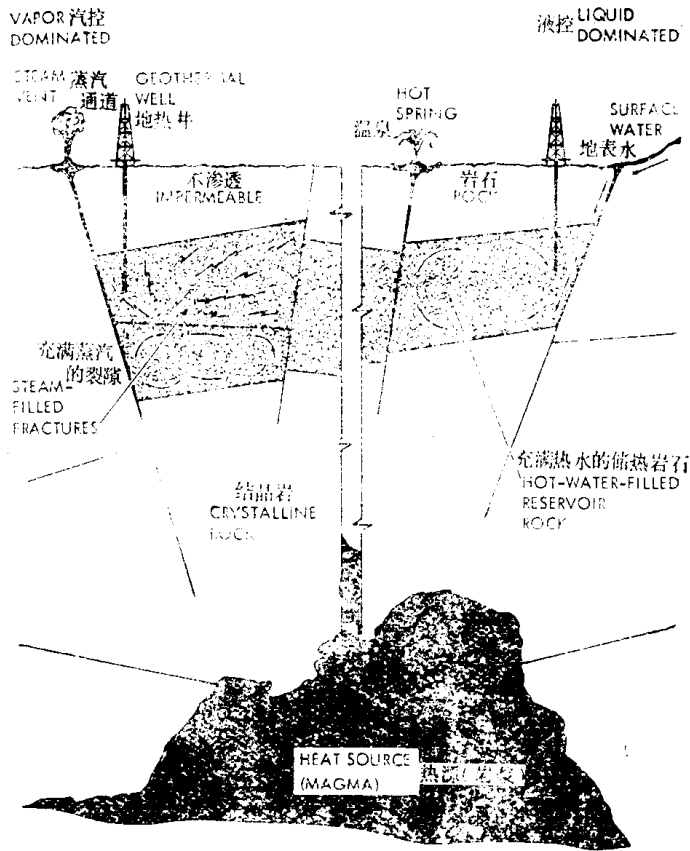


图 1-2 水热热储示意图 (根据 Leibowitz, 1978, 能源的途径)

热水热储被称为液控型，而贮有蒸气的热储则被称为气控型^①。Kruger和Otte(1973)曾经指出，前者热储类型的数量要远比后者多。水热系统常常存在于渗透性沉积岩或火山岩中，以及可以沿断层或裂隙保持开放通道的高强度岩石，如花岗岩

^①在有的文章中，“液控”和“气控”也被译为“以液体为主”和“以气体为主”——译者。

(White等人, 1971)中。对于勘探来说, 有希望的地区通常总是伴有以下一种或数种标志:

1. 近期火山活动
2. 频繁的地震活动
3. 高水平的导热流
4. 温泉
5. 喷泉或喷气孔

水热型资源的勘探必然会伴有大量的风险。Leibowitz (1978) 认为, 在勘探地热能源时, 要进行如下的工作:

1. 获得政府的许可和赞助
2. 对温泉和其他地表标志进行调查
3. 地球化学勘测
4. 地球物理勘测
5. 在浅井孔中测量热流
6. 钻深井, 然后测试流量

最后一项工作看来便是为地热资源的存在提供决定性的数据。初探井的成功率为10%或更少些, 而勘探井的费用要超过一百万美元。发现地热储之后, 便开始远距离钻井, 以确定热储的范围。为确定热储的生产能力, 还要利用试井、岩芯分析与生产层评价技术。

(二) 热火成岩体型

这一类型是由接近地球表面的岩浆房构成的, 岩浆房是由地壳深部产生的熔岩的浮升形成的。热火成岩体系统可以分为两组: 干热岩 (HDR), 即其中的岩浆不再处于熔融状态, 但仍非常炽热($<650^{\circ}\text{C}$); 火山型, 其岩浆仍有部分熔融($>650^{\circ}\text{C}$)。在后一种情况下, 由于埋藏太深(大于3km), 温度太高(650°C — 1200°C), 其热能用目前的技术尚不能回采。然而, 干热岩由于处于液态岩浆房的边缘, 对于回收热能, 则是很好的候选对象。为了在渗透率低到非常低的岩石中建立循环回路, 可在特殊的定向井之间建立水力压裂系统。一般说来, 从这种类型的地热

资源中经济地提取能源，还有待于将来。尽管目前在新墨西哥洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos, New Mexico) 的实验结果是十分令人鼓舞的 (Smith等人, 1975)。

(三) 导热控制型

绝大多数的热能是通过热传导由地球深部传输到地表的。为在地下获得 100°C 的温度，人们要钻5—10km深。开发导热控制型的地热当前还无经济价值。目前，接近地表（小于3km）的低品级水热资源具有更大的吸引力。

地压型地热能源，作为一个独立的分支，已经包括在导热控制型以内。导热控制型一般位于第三纪地槽中，例如美国的墨西哥湾海岸的沉积盆地。在这些幼年盆地中，沉积了大量细粒、充水沉积物，这些沉积物很快地被覆盖，并压实 (Rieke 和 Chilingarian, 1974)。所形成的覆盖层的重量通常会减少这些沉积层的厚度。然而，如果在压实过程中原生水从页岩孔隙中排出速度减低，便会形成过压流体区。圈闭的孔隙水和沉积颗粒的可压缩性都较差。(Chilingarian等人, 1973)。沉积物的整个体积只有排出这种孔隙水才会有明显的减小。Lewis和Rose (1969) 曾经指出，这个过压区会形成一道热障，圈闭的水量越多，高流体压力区便越隔热。除这些流体的水动力与热能会形成热水外。溶解的天然气氧化燃烧也产生热能。Matthews (1980) 曾对地压型热储中的天然气的特性与析出作了详尽的论述。

本书第二章总结了全世界范围内地热能的利用情况，为资源方面的一些术语和概念确定了含义，对资源和储量进行了评价，并为这种评价选择了过渡性的方法。表 1-1 所示为地热资源的不同类型、其典型的岩性学，以及有关的钻探问题。

尽管我们在评价地热基础资源的潜力时十分谨慎，但是由于它是一种相对较新的能源，实际地热钻探操作中所提供的数据也很有限，所以，精确的定量评价是很难确定的。对其他能源资源诸如石油、天然气、铀、煤、水以及矿物等进行评价则比较容易得到更精确的验证，因为多年来在这些方面已积累了大量的数

据。而在地球表面，只有很少的一部分地区已经进行过勘探，探测并找出地热异常。绝大多数的深藏地热源需要用地面物探方法来圈定和确定潜在能源的延伸范围。即使在这种情况下，也需要利用钻探来确定和测出热储的潜在生产力。

除了通常用于发电的蒸汽和热水资源之处，我们也不应该忽视中、低温热水资源。这对于空间采暖、工业加工、谷物烘干以及造纸业等都具有非常重要的作用。对于地热这种新能源来说，经济的发展、技术的不断改进，以及地热井数量的增加都将会进一步开拓新远景。

**表 1-1 地热资源、典型的岩石学，
以及有关的钻探问题**

资源类型	主 要 特 点
水热型	比油气钻井所遇到的温度要高（最高达350°C）。一般位于坚硬的研磨性火山岩中，尽管也有一些存在于沉积岩中。
地压型	正式发现是在墨西哥湾沿岸地区钻油气井时找到的。一般位于相当深度的沉积盆地中（可达地下25,000英尺）。
干热岩	水热能方面的发展可以直接用于这种类型。由于不存在高速流体所产生的腐蚀、冲蚀和事故等问题，所以钻探工作要比钻蒸气井或过热水井安全。
岩浆型	溶岩顶部的热源一般在地面3km以下。需要在650°—1200°C的高温下钻进到3—6km的深度，目前尚不能。主要问题是井壁坍塌，同时还有采用热交换设备问题。也应料想到卡钻。
正常梯度	必须钻到相当的深度。在水热能方面有了新进展才能利用。

三、地热基础资源^①的计算

第二章中例举了地热基础资源的实例。确定基础资源需要测定地温梯度、地下热流以及岩石热容量的定量值。然而,应该意识到,尽管在最认真勘查的地热地区,也仅有少量几个数值是已知的,而且常常仅限于一定的数量级之中。

(一) 温度梯度和地热资源

温度梯度的测量对于地热资源勘探是有用的。因为它可以使我们迅速发现热异常,并对其延伸范围进行估价。Vaught (1980)曾指出,由于以下三个原因,在使用梯度值估计测量深度以下的温度时,必须慎重。

1. 温度梯度是随岩石种类变化的。与白云岩和胶结很好的砂岩相比,页岩和非固结沉积岩的热导率则相当低。由于热导率影响温度梯度,所以,深部温度的估计必须依靠地质学的知识。

2. 随着深度的增加,致密与胶结性也增高,热导率也随之增大。因而,梯度随深度的增加而减少。这样,观察点以下的梯度的线性估算所预示的温度可能会比实际情况高得多。

3. 在浅钻孔进行的梯度测量会受到诸如地下水沉降和运动等近地表作用的强烈影响。人们很早便注意到,异常高的孔底温度(从而,梯度上升)经常出现在浅钻孔中(Vaught, 1980)。甚至在超过数千英尺深的井中,地下水的运动还是能够改变地温梯度的。

这里提供了利用地热温度梯度计算冷却花岗岩体的潜在热能,以及确定美国北阿巴拉契亚(Appalachian)盆地基础资源的实例。

从200°C冷却到0°C的40立方英里的火成岩(花岗岩)体中,提取潜在能可达到 1.71×10^{19} cal (见图1-3)。

储存在这个花岗岩块体中的显热是用下述公式计算出来的:

^①基础资源, resource base, 或称“资源底数”、“资源基础” 译者