

GEOHERMAL LOG
INTERPRETATION

地热测井 资料解释

J. K. 哈伦堡



● 石油工业出版社

地 热 测 井 资 料 解 释

J. K. 哈 伦 堡

雍世和 译 张庚骥 校

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是根据美国测井分析家协会 (SPWLA) 1982 年编辑出版的 "Geothermal Log Interpretation Handbook" 一书翻译的。为了突出重点, 精简篇幅, 本书围绕有关地热储集层、地热测井及资料解释与应用这个中心内容选译了原书中主要的五章。书中重点阐述了地热储集层特征及其分类, 应用各种测井资料来评价地热储集层的理论与方法, 特别是在火成岩与变质岩中测井资料的解释和应用。介绍了采用中子测井和瞬态井温测量资料确定真实地层温度及热导率的方法, 以及裂缝性火成岩地层的测井刻度模型等。本书内容广泛而新颖, 是有关地热测井资料解释与应用的一本很有价值的参考书, 可供从事地热、测井、地质、工程与水文地质等工作的工程技术人员, 科研人员以及有关院校的师生参考。

Geothermal Log Interpretation Handbook

James K. Hallenborg

Society of Professional Well Log Analysts

Tulsa, Oklahoma U. S. A

1982

*

地热测井资料解释

J. K. 哈伦堡

雍世和 译 张庚骥 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $11\frac{3}{4}$ 印张 286 千字 印1-2,000

1989 年 12 月北京第 1 版 1989 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0252-3 / TE · 248

定价: 3.65 元



前 言

我国有着非常丰富的地热资源，但这些宝贵的自然能源还远未能得到充分的开发与利用。为了适应我国大力勘探与开发地热资源的需要，特翻译了此书。它是根据美国测井分析家协会 (SPWLA) 1982 年编辑出版的“Geothermal Log Interpretation Handbook”一书翻译的。书中共收集了过去发表的 18 篇有关地热储集层、地热测井及资料解释与应用等方面的重要论文，并按七章编印。另外，附加常用测井名词术语汇编与参考文献总目录两章。它是迄今为止有关地热储集层、地热测井及地热储集层测井评价等方面最全面系统的一本论文集。不仅内容广泛而丰富，而且还收集了比较全面的各种岩石矿物骨架的声波、密度和中子测井响应值及其它地层参数值。它不仅对地热勘探开发部门，而且对油气勘探开发、矿床勘探、工程与水文地质等部门，均有很好的参考价值。由于原书内容比较繁杂，篇幅较多，为了突出重点，精简篇幅，本书围绕有关地热储集层、地热测井及资料解释与应用这几方面的内容，选择翻译了其中的五章，删去了原书中的下列四章：第四章钻井岩屑录井与岩芯分析；第七章美国几个地热田的地质情况及地热测井资料解释的具体经验的介绍；第八章常用测井名词术语汇编及第九章参考文献总目录等。在翻译中还删去了内容重复和叙述繁琐的部分。由于译者水平有限，时间紧迫，难免有不妥之处，敬希读者批评指正。

雍世和
1987 年 4 月

目 录

第一章 地热测井的目的和用途	(1)
第二章 地热储集层及分类	(4)
第三章 地热储集层的评价	(18)
第一节 应用地热测井资料评价地热储集层的产能	(18)
第二节 根据测井资料确定岩性与热液蚀变地层	(38)
第三节 估计沉积岩类型地热储集层的 Q_v 剖面	(49)
第四节 岩石骨架的声波、密度和中子响应值以及其它地层参数值	(57)
第五节 根据测井资料评价流纹岩 - 玄武岩 - 火山灰地层层序	(90)
第六节 火成岩与变质岩的井眼地球物理学	(99)
第四章 地温测量	(117)
第一节 地层温度探测器的评价	(117)
第二节 根据瞬态井温测量资料估计真储集层温度	(147)
第三节 用测井资料确定静态地层温度的一种经验方法	(158)
第四节 测量地热储集层的热导率	(164)
第五章 裂缝性火成岩地层的刻度模型	(173)

第一章 地热测井的目的和用途

目前,对于一口热液地热井来说,可接受的最低热水产量为 100000 lb/h,其温度约为 400 °F 或更高。当采用的水为 8.35lb/gal 或 42 lb/bbl^① 时,这个最低产量可转换为 285 bbl/h 或 7000 bbl/d。再考虑到公用事业公司对每口地热井使用期限为 30 年的限制,则一口井在每 30 年期间可接受的最低产量应为 75000000 bbl (即 2500000 桶/年)。

在所有地质环境(沉积岩、火成岩和变质岩)中,均会出现热液地热储集层。这些储集层,主要是以裂缝孔隙度和渗透性占优势的开放型储集层,即使是沉积岩中的地热储集层也是如此。大多数含油气储集层在具有粒间孔隙度的沉积岩中形成封闭性储集层。这是油气储集层和地热储集层的主要区别之一。其它的主要区别是用以分析每种储集层的各种物理性质。在油气储集层解释中,电测井资料和电阻率公式(阿尔奇公式)是很重要的;而在地热储集层解释中,热测井资料和地层温度数据是很重要的。

本章目的是介绍在上述条件下,测井技术在地热环境中的用途和效果,地热测井的局限性,以及截止 1980 年 5 月为止所采用的高温测井仪器。

一、电缆测井的目的和用途

在地热勘探和评价中,电缆测井有三种用途,即储集层参数分析,确定岩性剖面 and 划分储集层范围。

为了了解地热储集层的产量、开发年限和生产潜力,需要取得储集层测试(流动测试)资料。这些资料是地热勘探的一种粗糙的地下测量结果。从地热勘探井中获得的电缆测井资料常常用来详细地确定和计算储集层的温度、厚度、横向范围、裂缝的数量和粒间孔隙度,以及可能采出的流体性质及数量等参数。为了确定地热储集层岩石和流体的固有特性,应对岩芯和钻井岩屑样品进行实验室测量。为了将储集层测试资料和岩芯资料作对比,并把两者联系起来,减少流动测试所需时间,以及预测地热田的生产寿命(可获得的流体数量及热量),需要进行电缆测井测量。

在地热勘探中,需要用电缆测井资料来帮助进行井与井之间的地层对比和岩性研究。一般是通过综合岩屑录井和岩芯描述,并将它们与测井资料进行对比后作出岩性剖面的。在火成岩和变质岩中,当把测井资料同钻井录井资料进行对比后,深度准确的详细测井资料可以作出相当好的岩性剖面记录(Benoit等,1980)。在沉积环境中,如在Imperial山谷那样,在绘制岩性剖面时,电缆测井消除了钻井岩屑录井的取样层段的深度偏差和粗糙性(Miller和Elders,1980)。

用现场所获得的地热测量资料可以确定地热区的区域地质特征和地球物理性质。这些资料亦用于决定地热的远景区和确定探测潜在地热储集层的钻井位置。在石油和天然气工业中,经常将适当的测井资料(具有好的垂向分辨能力)同地面地球物理资料(具有好的横向控制能力)结合起来,特别是将地面地震勘探资料同声波-密度测井资料相结合(Stone和Evans,1980)。最近将井下电阻率资料同地面电阻率资料(大地电磁法)结合起来进行研究,可以得到地热储集层的三维显示图(Rigby,1981)。

① 原文误为 gal/bbl (加仑/桶)。——译者

对地热井岩芯样品进行实验室测量,可以确定地热勘探区储集层岩石的固有特性。这些测量结果可以把地热储集层的区域地质资料和地球物理资料同电缆测井资料联系起来。用电缆测井资料可以更好地了解地热储集层。将岩性分析资料(小范围的)与电缆测井资料(局部的),地球物理测量(区域的)资料进行对比,并把它们联系起来,可以达到扩大探测范围和更好地了解地热储集层的目的。

1. 地热测井的局限性

当用地球物理电缆测井仪器进行地热井测井时,遇到的两个主要限制是高温和未知的岩石响应。第一个限制是对测井探测器、电缆和电缆连接器的温度限制。在地热井中进行测井时,由于这个限制,在部分井的测井中会经常发生事故。表1-1、表1-2给出了两家服务公司的高温测井探测器性能的清单。这些探测器中大多数额定的最大温度为260 °C (500 °F) 这两家公司的电缆和电缆连接器也是按此温度设计的。目前,各种井下仪器的可靠性还是一个问题,但是正如表1-1和表1-2所指出的那样,核测井仪器(密度、自然伽马和中子)是比较耐温的,它们一般比电法或声波测井仪器更可靠。

在用地球物理电缆测井仪进行地热测井时的第二个主要限制是不知道测井仪对岩石的响应特性,因为地热井和地热田主要是局限在非海相沉积岩、火成岩和变质岩(热液蚀变岩石)的岩性中。这些岩性不是在油气评价中经常遇到的岩性,因而象在油气储集层中已知的那些岩石响应特性的背景材料,在地热储集层中是很缺乏的。在地热井中经常是不取岩芯的,因而岩芯分析资料,特别是在储集层温度和压力条件下的岩芯分析资料是很少的。将储集层测试(总的测量)和测井响应(详细的测量)与岩芯分析资料对比,进行现场检验,在地热井或地热田中不是经常能够实现的。因此,在这方面还需要更多的资料才能更好地了解地下岩石的各种性质。

2. 现用的高温仪器

表1-1和表1-2给出了当前采用的高温(≥ 500 °F)测井仪的性能。

表 1-1 德莱赛 - 阿特拉斯 公司的高温测井仪的性能

	最大压力	最高温度
高温密度测井仪 ^①	138Mpa (20000 psi)	260 °C (500 °F)
高温自然伽马/中子测井仪 ^① (热中子和超热中子)	172Mpa (25000 psi)	260 °C (500 °F)
高温井径/井温仪 ^②	138 MPa (20000 psi)	288 °C (550 °F)
高温涡轮流量计 ^①	117 Mpa (17000 psi)	260 °C (500 °F)
高温流体取样器 ^②	138 Mpa (20000 psi)	288 °C (550 °F)

① 试验温度为 288 °C (550 °F);

② 试验温度为 316 °C (600 °F)。

表1-2 斯伦贝谢公司的裸眼井恶劣环境测井仪 (HEL)
(用于地热井的高温测井仪)

	最大压力	最高温度
感应测井仪	172 Mpa (25000 psi)	260 °C (500 °F)
双侧向测井仪		
声波测井仪		
伽马 / 中子测井仪	138 Mpa (20.000 psi)	260 °C (500 °F)
伽马测井仪		
地层密度	172 Mpa (25000 psi)	260 °C (500 °F)
补偿中子		
流量计 - 井温仪	138 Mpa (20000 psi)	260 °C (500 °F)

注：上述仪器均能在 550 °F 条件下短时间工作。

3. 基本参数和参数分类

表 1-3 为第 21 届 SPWLA 年会 (1980. 6. 8 ~ 11) 翻印的, 它给出了评价地热储集层的探井和生产井所需的参数及通常用地球物理测井导出的资料清单。该表中, 地层评价栏表示最终用于描述整个储集层特征的测井项目; 生产管理栏表示从工程上为保证在若干年内保持井的产量, 以及为提供设计和操作地面设备所需的资料而必须进行的测井项目。

表 1-3 地热储集层测井解释的基本参数

地 层 评 价	生 产 管 理
1. 时间 - 温度下降剖面测量用于确定真地层温度剖面	1. 包括流量的流动剖面
2. 地层的岩性、深度和厚度	2. 压力剖面
3. 渗透率。包括岩石骨架的粒间渗透率和裂缝渗透率	3. 流体成分
4. 孔隙度。包括岩石骨架的粒间孔隙度和裂缝孔隙度	4. 井眼和 (或) 套管的机械条件, 如:
5. 裂缝系统的深度、方位、渗透率及其特性	a. 剥落
6. 井眼几何形态。它可作为裂缝的指示, 特别是井径可作为其它测井资料质量和校正的指示	b. 腐蚀
7. 流体成分	c. 水泥胶结质量
8. 热导率与热容量	d. 井眼系统本身的机械性质
9. 几种岩石的弹性模量。它在设计井的增产措施时是很有用的	

第二章 地热储集层及分类

根据测井响应的特点来确定地热储集层的特征, 为提高储集层分析精度提供了一种方法。在本章中, 为了对储集层进行分类, 我们试图将地热储集层的典型特征与它们各自的测井响应特性放在一起进行研究, 从而描绘出具有相似性质的一类储集层。根据由一种或一组储集层物理性质确定的几种分类方案, 我们介绍了最适合于各类储集层的测井解释技术的发展情况。这些物理性质包括岩性、流体相、流体化学性质、储集层温度、孔隙几何形态及某些综合的地质因素。

地热资源的勘探与开发的成功率, 在很大程度上取决于对造成地热异常的这些物理因素的识别程度。了解这些因素在不同地质环境中以单独的或者组合的形式出现的原因, 对于用测井解释分析储集层特征是十分重要的。在本章中将详细地讨论与地热现象有关的术语, 地热系统的类型和它们的地质环境, 以及地热资源的评价。

下述每种储集层和流体的性质都可选作为分类方案的基础, 即岩性、流体相、流体化学性质、储集层温度、孔隙几何形态及某些综合的地质因素。每种方案均按测井分析的观点进行详细地研究, 并介绍每种方案的储集层分类情况。所给出的实例均选自美国。本文讨论了每类地热储集层的测井解释问题, 并考虑了每类地热储集层出现的次数。

一、理论基础

在世界上许多地区已经证明地热能源是具有商业价值的。测井在地热(热水或热蒸气)储集层的勘探和开发中所起的作用, 就象在石油工业中那样重要。地热井的测井和测井资料解释是相当新的领域, 因而存在着许多问题(Sanyal 和 Meidav, 1977)。这里着重于地热测井解释方面的论述。

本章所介绍的研究目标是按测井解释标准来定义地热储集层的类型。换句话说, 这项研究试图根据测井解释的观点建立一种或更多种地热储集层的分类方案。同时希望能够将大量已知的地热储集层划分为少数几类储集层, 而每类储集层均具有明显不同的一组测井响应和典型的测井解释问题。在建立这样的分类方案中, 第一步是研究与测井响应有关的重要的储集层特征。

下述储集层和流体的性质常常决定着储集层的测井响应:

- 1) 岩性
- 2) 流体的相
- 3) 流体的化学性质
- 4) 储集层的温度
- 5) 孔隙的几何形态
- 6) 某些综合的地质因素

就所考虑的测井响应来说, 岩性也许是最重要的储集层性质。因为岩石骨架占据储集层总体积的主要部分。流体相是重要的, 因为水和蒸气具有不同的测井响应, 正如油气储集层中的石油和天然气那样。而且, 干蒸气储集层不同于含热水的储集层。在测量中所存在的某些特殊问题将在下节中指出。除了热和干岩石系统外, 地热储集层完全被水(以液相或蒸

气相)饱和。然而,地热水的化学性质随着所溶解的固体和天然气的性质和数量而有很大的变化,其变化程度远远大于油田水。被溶解固体的总量(TDS)或它的“等效氯化钠浓度”常常是油田水化学性质的一种很好描述。但在地热系统中,用被溶解固体的总量(TDS)来单独描述流体的化学性质是不充分的,因为氯化钠未必是占优势的成分。

储集层温度对地热测井的影响有两个方面:地热井的温度往往超过许多标准测井仪器的允许范围,而且温度又影响着许多岩石和流体的性质。孔隙空间的性质和几何形态对地层的声波和电阻率响应有很大的影响,因为孔隙空间控制着声波和电流通过地层的途径。从另一方面看,探测各种岩性剖面中的裂缝常常是地热工业中测井的主要目的。因此,孔隙几何形态是一种重要的性质。

除了上述岩石和流体性质以外,还有对测井响应产生影响的某些综合地质因素。每个地质区域都具有岩石和流体性质的综合特征,这些特征产生了该区域特有的一组测井响应。比如,在石油工业中,人们在谈论典型的测井解释问题时,常提到墨西哥湾、落基山、加利福尼亚、北海等典型地区。类似地,在地热工业中,测井分析研究中的区域性差别(从地质意义上说)将来也很可能出现。

二、地热储集层的分类方案

显然,根据上面的讨论,对测井解释来说,人们能够根据上面所列出的任何一种储集层和流体性质,对地热储集层进行分类。下面将详细地研究这些不同的分类方案。表2-1列出这些分类方案以及每种分类方案中储集层的类型。

1. 按流体类型和温度分类

地热储集层可能被水或蒸气饱和。在某些条件下,原生蒸气帽可能存在于热水区的上部。如果在储集层衰竭期间,流体压力(在超过储集层温度下)降到水的蒸气压以下,则开发热水储集层的次生蒸气帽或饱和井眼附近岩石的蒸气是可能的。在新西兰的Wairakei热水储集层中已开发出饱和蒸气。在地热工业中,试图获得的商品是“热能”,所以一个地热储集层不一定含有任何流体,只要它含有充分的热能并具有可接受的温度水平。在新墨西哥州的Jemez山中,一种这类“干热岩”系统正被Los Alamos科学实验室(LASL)进行实验性的开发。

热水储集层的温度可能都是从环境温度到接近水的临界温度 360°C (680°F)之间的任何温度。在加利福尼亚Imperial村的Niland(即Salton Sea)地热储集层有一个温度接近于水的临界温度的储集层。在美国为建立电站而开发的地热储集层温度全部都在 149°C (300°F)以上。在当前技术条件下,工业用地热发电站所使用的温度范围具有最低的经济价值。然而,具有水温低于 93°C (200°F)的储集层正被考虑来发展非电力应用。地热水的温度越高,热力学的能量转换效率也越高,经济效益也越好。因此,合乎逻辑的是不仅要根据流体类型(蒸气,水,干),而且还要按流体温度来对储集层进行分类。

为此目的,我们将热水储集层划分为:高温类,温度大于 204°C (400°F);中温类,温度介于 149°C (300°F)~ 204°C (400°F);低温类,温度小于 149°C (300°F)。

图2-1示出美国已发现的热水储集层的温度分布,它们是根据地质调查研究所1975年726号通报的资料得出的。图2-1a示出从 93°C (200°F)开始的各温度类的所谓“热液对流系统”的个数。显然,较高温度的储集层是少见的。在美国地质调查研究所726号通报列出的297个热水储集层中,有188个是属于低温类;92个属于中温类;只有17个是属于高温类。图2-1b标明在各种温度类型中已知的水热储集层所包含的总热量。看来好象低温类和

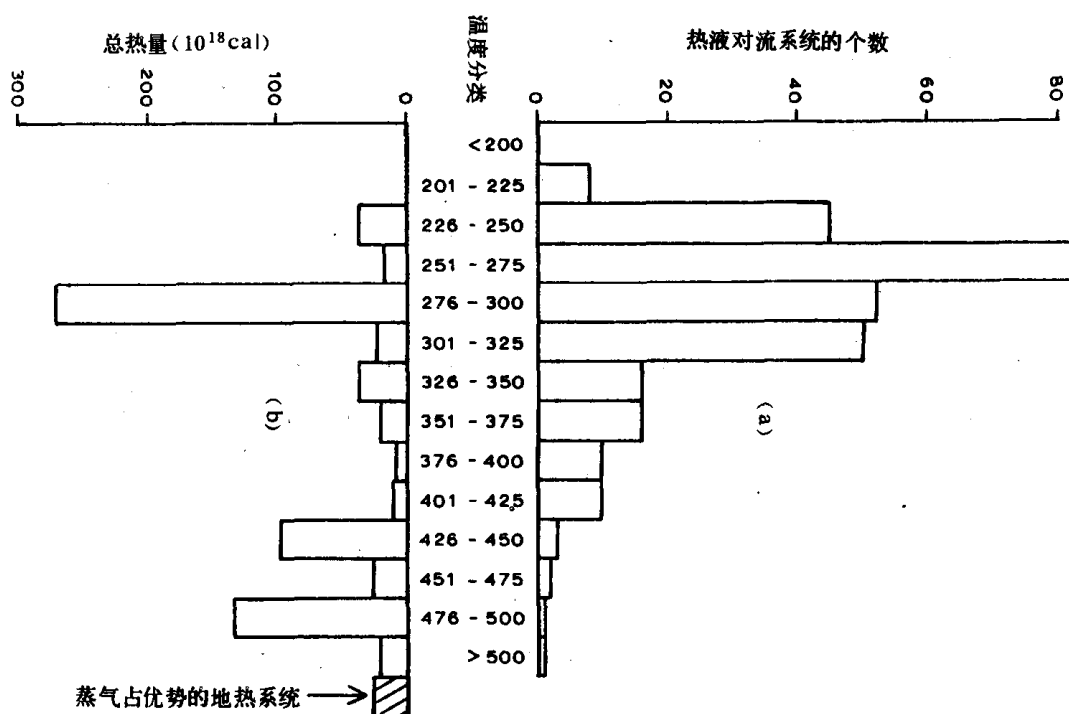


图 2-1 美国已知热水储集层的温度分布

高温类具有比中温类高的总热量。但是，不适宜于发电的低温类储集层在经济上只有较小的吸引力。高温类储集层是这三类储集层中最有利的，但它们较少出现。

干蒸气储集层是很稀少的，在世界上只有五个地热田被证实是干蒸气储集层：加利福尼亚的 Geysers；意大利的 Lardarello 和 Monte Amiata；日本的 Matsukawa 和 Onikobe 等。所有这五个储集层均在进行生产。根据 1976 年的资料，这五个储集层生产了 965MW 的电力，而全世界总地热发电为 1500MW。前者约占 65%。尽管干蒸气储集层很少出现，但它们是很有利的电力来源。在美国被认为可能是这类储集层的只有两个：一个是在加利福尼亚州的 Mount Lassen 国家公园；另一个是在怀俄明州的 Yellowstone 国家公园。所有已知的干蒸气储集层几乎都呈现出相同的蒸气温度和压力——大约为 240°C (464°F) 和 3447000Pa (500psi)。这种温度和压力条件相当于与水接触时蒸气的最大焓条件。在干蒸气井中测井时，这些条件会产生特殊问题。

在 Geysers 地区钻了一百多口蒸气井，但只有少数几口井进行了测井。因为在大多数这类井中进行测井时，由于高温使井下仪器和电缆发生了严重的故障。在 Geysers 地区，一般是在深度为 $180 \sim 2740\text{m}$ ($600 \sim 9000\text{ft}$) 井段进行生产。大约在 300m 以下，井内泥浆柱

静水压力超过储集层压力。在最大生产深度处,泥浆静水压力达 26500000 Pa (3800psi)。它几乎比储集层压力高出 3447000 Pa (500psi)的一个数量级。因此,这些蒸气储集层是欠(负)压的,如用泥浆钻井,则会产生不可控制的循环漏失问题。在 Geysers 地区,目前的实际作法是先用水或泥浆钻井到水层底部,然后下套管,继续用空气钻井直到蒸气储集层。在蒸气井中不能进行声波、直流电阻率和自然电位测井,因为这些井中充满空气或干蒸气而不是液体。此外,由于饱含蒸气地层的电阻率太高,以致不能做任何有意义的电阻率测井解释。目前在高温热水井中进行测井时,在测井前的一段时间内先用冷的流体循环使井眼冷却。但对 Geysers 地区的蒸气井,这是不可能的。因为储集层的压力特别低。然而,在某些蒸气井中,已成功地进行了自然伽马、中子和密度测井。

在低温类储集层的热水井中,可以进行全套标准测井。如果采用循环冷却法将井眼冷却到 177°C (350°F)以下,那么在中温类储集层的热水井中也可以进行全套标准测井。 177°C 温度是当前大多数测井仪器有效工作的实际范围。将许多高温类储集层的井冷却到足以用标准测井仪器进行测井的温度以下是不现实的。Sandia 实验室及某些测井公司已研制出高温测井仪器和高温电缆,它们的耐温程度达 260°C (500°F)。这类仪器正在进行试验和完善。甚至当这些仪器普遍使用时,在高温井中测井的某些危险仍然存在。

在许多热水井中已进行了井温,带浅聚焦装置的双感应(一般较少单独测感应),带有 SP 的中子和密度,以及自然伽马和井径等一组测井。在某些温度较低的井中进行了地层倾角、声波和生产测井。

在进行人工压裂之前,干的热岩石系统不会有任何有重要意义的孔隙度和渗透率。因此,在对这类系统进行压裂之前,电测井的应用受到了限制。其它测井如自然伽马、伽马能谱、中子、密度和声波测井可用于鉴别岩性和确定地层的力学性质(如破裂压力梯度)。在进行人工压裂以后,可用几种测井方法探测和评价裂缝。这些方法有全波列声波测井,井下声波电视,可能还有自然电位 SP(可指示裂缝性地层中的流动电位)和电阻率测井(裂缝带为低电阻率)。

按温度对储集层分类的另一个原因是,温度的高低对储集层的许多岩石学性质可能有很重要作用(Sanyal 等, 1974)。例如,众所周知,渗透率随温度升高而降低(Weinbrant 和 Ramey, 1972; Casse, 1974; Aruna, 1976 等)。因此采用在地面室温条件下分析的岩芯资料对地热井测井进行标准化是有问题的。不幸的是,现在对于高温高压对储集层岩石的影响的了解还是很原始的。然而,可以说温度越高,这种影响也越大。

2. 按岩性类型分类

从岩性观点看,通常将油气储集层划分为两大类:砂泥岩和碳酸盐岩岩性(含有或不含有砂,泥质,硫酸盐等)。只有少数含油储集层呈现出其它岩性成分,如黄铁矿,褐煤或煤,凝灰岩等)。因此,一般测井分析技术是为沉积岩,特别是砂岩、泥岩、石灰岩、白云岩和硬石膏等岩性设计的。另一方面,地热储集层可以具有任何类型的岩性——沉积岩,火成岩或变质岩。在这类储集层中,人们经常遇到新的不熟悉的岩性,如结晶的火成岩或变质岩,多孔状火山岩,玻璃质或结晶的火山岩,火山灰,熔结火山岩碎屑,热液矿床和蚀变产物。甚至沉积岩地热储集层也经常呈现有大量的火成岩侵入,接触变质和热液蚀变。不象沉积盆地那样,火成岩和变质岩区,特别是经受过热液蚀变作用的这类岩石,经常表现为高度的非均质性。因而在同类的火成岩或变质岩地热储集层中,从一个层位到另一个层位,或者从

● 原文误为 26500 Pa ——中译本译者

一口井到另一口井时,岩性都可能是完全不同的。

任何新的岩性都给测井提出若干问题。大多数测井仪的标准刻度方法对这类新的岩性是不够的。各种测井仪器都是对油气储集层中普遍存在的已知岩性进行刻度和校验的。当遇到特殊岩石类型时,测井响应可能是很离奇的,故对这类测井响应需要作某些校正。对大多数特殊岩性来说,这种校正量是不能预先估计的。例如,在 LASL 的干热岩石地热储集层的勘探设计中,GT-2 号井中出现这样一些地层:它们的体积密度增加,声波传播时间并没有相应的降低(West 等,1975)。这种现象的一种解释是在这些地层中的铁镁质岩石可能具有比用于密度测井仪器刻度的介质要高的电子密度。在同一井中,一个地层显示为声波传播时间降低、对应的体积密度增高,但视中子孔隙度也明显增加(West 等,1975)。这种现象被解释为由于高中子俘获截面物质(可能是铁镁类侵入体)的存在。刻度资料不适用于解决这类问题。在该井中,另一个地层显示为体积密度和视中子孔隙度均增高,它们被认为是具有高中子俘获截面和高电子密度的物质的指示。在处理新的特殊岩性时,标准的解释方法和解释图版常常是不适用的。例如,在几种孔隙度测井数据的交会图中,某些地热层的点子落在标准交会图版范围之外。在爱达荷州 Raft 河的地热田的某些井中,体积密度往往超过 $3.0\text{g}/\text{cm}^3$,这个值是所有标准图版中密度值的最大极限值。在新的特殊岩性剖面中测井和测井解释期间,可能还有某些测井质量问题尚未被发现。在现有测井文献中,没有给出火成岩的骨架参数值(如体积密度,声波传播时间,中子孔隙度,中子俘获截面等),只有火成岩和变质岩中的少数造岩矿物的骨架参数。

按岩性划分地热储集层的试验性分类方案示于表 2-1 的方案 II 中,沉积岩地热储集层的测井响应及有关测井解释问题与含油气储集层相类似。沉积岩地热储集层可能是:砂岩-泥岩层序(如加利福尼亚州 Imperial Valley 地区的 Heber, East Mesa 和 Brawley 地热田),含有火成岩侵入体或热液蚀变物的砂-泥岩层序(如加利福尼亚州的 Salton Sea 地热田),含有火山灰凝灰岩和火山流夹层的砂岩-粉砂岩-泥岩层序(如爱达荷州的 Raft 河地热田)。到目前为止,在碳酸盐岩石中还未发现重要的地热储集层。可以预料,目前的测井分析技术水平对于处理沉积岩地热储集层岩性是足够的。然而,当遇到接触变质和热液蚀变岩石时,需要对测井分析方法作某些修改。在 Imperial Valley 地热储集层中,已成功地采用了砂-泥岩测井资料的计算机处理解释。在爱达荷州的 Raft 河地热储集层中,已获得了复杂岩性测井资料的计算机处理结果。

对其它类型的岩性,目前的测井解释技术是不够的。采用传统的交会图、直方图和计算机处理的复杂岩性测井解释方法,正被用于火成岩和变质岩类型的岩性。但是从一个地层到另一个地层时,矿物成分的骨架响应值可能有很大的变化。在鉴别某些岩性时,自然伽马能谱测井是很有用的(West 等,1976)。

3. 按地质区域分类

每个地质区域均有它自己的岩石物性特征。由于这个原因,对每个主要含油气区(如北海的海湾海岸等)均发展了通用的测井解释技术。这种惯例在地热工业中已被采用。例如,对加利福尼亚地质区的 Imperial Valley 的测井解释方法均已标准化,即用感应(或双感应-浅聚焦测井组合)和三种孔隙度测井系列作为根据的砂-泥岩解释技术。其它地热区域的解释方法,仍处于试验阶段。重要的是将所有已知的美国地热区域划分为数目有限的地质区域,确定每个区域的测井响应特征,并提出每个区域的最佳测井解释方法。

实际上,美国所有有重要商业价值的地热储集层都出现在落基山脉西部的地质上年代

较新的(晚新生代^①)或产生现代构造作用或火山作用的地区。这类地区是以近代富含硅质的火山作用, 高热流, 有大量断裂作用和强烈地震活动为特征的。已知大的主要地热储集层均位于表2-1中分类方案Ⅲ列出的七个地质区域中。然而, 正如表2-1所指出的那样, 这些区域还能再划分为性质不同的亚区。在这种分类中, 墨西哥盆地北部海湾的“地压力”(Geopressed)地热储集层不包括在内。图2-2示出上述地质区域的地理位置。

(1). 盆地和山脉区 这个地质区包括整个内华达州, 以及犹他州、俄勒冈州、加利福尼亚州、爱达荷和亚利桑那州的部分地区。两个主要地热源带位于沿盆地和山脉区东部和西部边缘延伸的地区。东带包括 Wasatch 前缘和它的正东部地区, 还包括犹他州和爱达荷州的部分地区。西带穿过俄勒冈州、加利福尼亚州和内华达州。中心区包括内华达和亚利桑那州。年代较新的硅质和玄武岩质的火山作用与断裂作用集中在东带与西带。

东带位于 Wasatch 前缘的正西面, 它是盆地和山脉区与科罗拉多高原—落基山脉间的断层边界。这个带沿南北方向延伸, 穿过整个犹他州, 并进入爱达荷州的南部距离约560km (350 英里) 的地方, 它的宽度约为100km (60 英里)。从地质上讲, 这个带与上述西带相类似; 然而, 这里的某些地热储集层(如 Roosevelt 温泉)有更高的温度。对发电来说,



图2-2 美国西部1968~1975年期间勘探与开发的地热田
(引自美国 Fish 和 Wildlife Service, 1976 资料)

● 该地质时代的定名不确切, 可能是晚第三纪以后或第四纪。——译者

Roosevelt 温泉的热水储集层在质量和数量上均有很好的商业价值 (Berge, 1978)。

在盆地和山脉区中心的一个重要地热区是在内华达州的 Beowawe, 在那里钻的井眼中遇到温度高达 200°C (392°F) 的热水。已经在内华达州、俄勒冈州和亚利桑那州的其他勘探区进行钻井, 在这些州和新墨西哥州的其他地区正在进行勘探。

西带是从俄勒冈州的 Lakeview 经过 Surprise Valley 和 Long Valley 到加利福尼亚州的 Coso, 长度约为 560 公里 (350 英里)。在内华达州的 Reno 附近, 它的最大宽度为 130 公里 (80 英里)。在那里, 它穿过 Carson 沙漠向东延伸。这里的地热储集层似乎全是热水型的。

在这个地质区域中, 可以利用的测井响应和测井解释信息是有限的。这个地区的主要测井解释问题是如何处理新的岩性 (侵入岩和喷出火山岩) 和探测裂缝性地层。

(2). 西北区 这个区包括华盛顿州、俄勒冈州和爱达荷州的主要部分以及加利福尼亚州、内华达州、怀俄明州和蒙大拿州的一部分地区。Snake 河平原和喀斯开特 (Cascade) 山形成两个性质不同的亚区。

Snake 河平原横跨爱达荷州和俄勒冈州, 它被很厚的年代较新的玄武岩熔岩流覆盖。迄今为止的勘探资料表明, 这个区域的储集层是相当大的, 但温度低。Snake 河平原的大多数储集层, 按我们的分类方案 I 讲, 是属于低温类型 (例如爱达荷州的 Raft 河、Home 山, 以及 Bruneau - Gradview 储集层)。

High Cascades 山亚区从 British Columbia 穿过华盛顿州和俄勒冈州到加利福尼亚州的 Lassen 山。这个区域的主要特征是有从二百万年至一千万年前大量喷出的玄武岩和安山岩熔岩及许多近代活火山 (如 Hood、Shasta、Lassen、Baker、Three Sister 及 St. Helena 等地)。有少量的喷气孔, 如在 Lassen 国家公园。在俄勒冈的 Klamath Falls, 有一个低温地热储集层, 几十年来一直用于环境供暖。在这个地区正在进行大规模的勘探, 在将来可能发现有商业价值的高温地热储集层 (Bowen, 1979)。

在西北部火山区的其余地方, 只发现低温地热储集层, 如俄勒冈州的 La Grande 地区。

虽然这三个亚区的测井响应和测井解释问题可能是不同的。但是, 西北部火山区有共同的岩性特征: 玄武岩、流纹岩和安山岩熔岩流、火山灰以及其间夹杂的沉积岩。在爱达荷州的 Raft 河地区, 应用复杂岩性测井解释方法已取得一些成功。然而, 火山流和火山灰 (特别是在热液蚀变作用后) 的测井响应常常是不能预测的。在大多数这些储集层中, 裂缝和可能的气孔提供了主要储存空间和流体流动通道。因此, 在这个地区, 用测井方法探测裂缝是很必要的。

(3). Salton 地堑 就商业价值的潜力来说, 美国最重要的已知地热区是在 Salton 地堑。它包括新墨西哥的 Mexical 谷, 加利福尼亚的 Imperial 和 Coachella 谷。这个地区位于沿加利福尼亚海湾延伸的主要断裂带的北端。这个区域的特征是高热液流、变化很陡的地温梯度、断裂和挤压作用以及少量的富含硅质的火山作用。这个地堑包括厚达 7000m (23000 ft) 的第三纪和第四纪陆相沉积。

在这个地质区域至少有五个主要的地热储集层。在新墨西哥的 Cerro Prieto 地区, 自 1973 年以来, 一个 75MW 的地热发电站一直在运转, 第二个 75MW 的发电站正在修建之中。按我们的分类方案, 这是一个高温和中等含盐量的储集层。在 Niland (Salton 海), 自 60 年代早期就已经鉴别出一个高温和超含盐量的储集层。这个储集层正在进一步广泛地探测, 但它的超含盐量的盐水及随之而来的腐蚀等问题至今仍妨碍着商业性开发。在 Salton 地堑还有另外的三个中等温度和中至高含盐量的地热储集层, 它们是东 Mesa、Hober 和 Brawley。

这个地质区域的主要岩性是三角洲砂—泥岩层序，因而在这个地区标准的砂—泥岩测井解释技术是有用的。砂岩是弱胶结到强胶结（或已变质）并被压裂的。在 Salton 海，偶而有火成岩侵入体存在，在某些地区还见到了热液蚀变现象。在这个地区，根据测井资料近似地确定地层水含盐量是很有用的，因为盐水和淡水含水层的分布很复杂。这个地区是一个主要的农业区，而且还是一个半沙漠区。它唯一的依靠是通过运河引入科罗拉多河的水来灌溉。因而，从环境及管理水的观点来看，了解井中地层水的含盐量剖面是很重要的，而测井资料可用于确定地层水含盐量剖面。

(4). 加利福尼亚北部海岸山脉区域 这个地区的范围比较小，但包括世界上最富饶的 Geysers 地热田。这个地热田位于 Clear 湖和 Sonoma 火山区，在地质特征上它是地质年代较新而富含硅质的。这个储集层是由强烈断裂和裂缝性杂（硬）砂岩组成。这是一个准静水压力下的干蒸气地热田。在这个区的某些地方直接利用了低温热水储集层。

干蒸气储集层的测井问题在前面已讨论过了。因为对测井系列的限制和复杂的岩性，对 Geysers 地热田的测井解释是很困难的。

(5). 格兰德河狭谷和科罗拉多平原边缘地 格兰德河狭谷宽达 160 公里（100 英里），从得克萨斯州的 El Paso 附近延伸到科罗拉多州中部，其长度超过 650 公里（400 英里）。这个区的特征是有张力断裂作用，盆地下降，年代较新的富含硅质和玄武岩火成岩的反复侵入与喷出。在这个地区有大量潜在的有价值的远景区。

在新墨西哥州的 Valles Caldera 正在开发一个商业性高温地热田。在靠近该地热田的地方，Los Alamos 科学实验室正在进行从干热岩石中提取能量的试验。储集层通常是裂缝性结晶岩石。测井的主要问题是根据测井资料确定新的岩性与探测裂缝。

4. 按孔隙几何形态分类

传统上测井分析强调评价给定孔隙性岩石体积中某种流体的含量，这是通过用测井资料计算地层孔隙度和流体饱和度来实现的。但是这些计算主要是考虑了储集层的存储能力。从商业上讲，一个储集层还必须有足够的流体流动能力，它是由孔隙度及孔隙几何形态控制的。如果两种岩石的孔隙度相同而孔隙几何形态不同，则它们可能具有十分不同的流体流动能力。

在地热储集层系统中，最重要的是裂缝渗透性，其次是粒间和多孔岩石的渗透性。大多数结晶火成岩和变质火成岩储集层只有裂缝渗透性。沉积岩岩性的储集层一般具有粒间渗透性；如果沉积物是固结好的，并受到热液蚀变或变质作用的话，它也会有裂缝渗透性。在某些火山流，特别是玄武岩流中，可以看到多孔状孔隙。通常，多孔状孔隙的几何形态能给出高的孔隙度和渗透率，极端的情况是浮石。它是孔隙非常发育的火山岩。一般来说，裂缝性岩石具有很差的储集能力，但有极高的渗透性。例如，在 Geysers 地热田中，孔隙度约为 2 ~ 5%，而产层的渗透率可能有高达几个达西。粒间孔隙几何形态一般具有高孔隙度和中至低的渗透率。例如，在 Imperial 山谷中，典型储集层具有约 20% 的孔隙度和 200mD 的渗透率。如果岩性是含泥质多或含有大量的火山灰，则其粒间渗透率可能是很低的。

按地热储集层的孔隙几何形态来对地热储集层进行分类的重要意义，在于不同的孔隙几何形态可能具有不同的测井响应。例如，在粒间孔隙占优势的介质中，声波通过岩石传播不受次生孔隙度（裂缝和孔洞的孔隙度）的影响。因此，在这类岩石中，用声波测井计算的孔隙度是原生孔隙度，并低于用密度和中子测井测量的总孔隙度。对某些地热储集层来说，要区分原生孔隙度与次生孔隙度是很困难的。比如，在火山流中，多孔状孔隙空间构成的是原

生孔隙度而不是次生孔隙度，声波测井值要受到这类孔隙度的影响。

表2-1 地热储集层的分类方案

-
- I. 按流体相和温度分类
 - A. 蒸气
 - B. 高温水：大于 204 °C (400 °F)
 - C. 中温水：149 ~ 204 °C (300 ~ 400 °F)
 - D. 低温水：小于 149 °C (300 °F)
 - E. 干层
 - II. 按岩性类型分类
 - A. 沉积岩
 - B. 变质岩
 - C. 火成岩 (结晶与玻璃质)
 - D. 火山灰及其有关的沉积岩、凝灰岩
 - E. 角砾岩
 - F. 热液蚀变的岩石
 - III. 按地质学区域分类
 - A. 盆地和山脉
 - a. Wasatch 前缘
 - b. 中心区
 - c. 西部边缘
 - B. 西北部火成岩
 - a. Snake 河
 - b. Cascade 山脉
 - c. 其它
 - C. salton 地堑
 - D. 北加利福尼亚海岸山脉
 - E. 格兰德河峡谷和科罗拉多高原边缘地
 - F. 夏威夷
 - G. 阿拉斯加
 - IV. 按孔隙几何形态分类
 - A. 沉积岩粒间孔隙度
 - B. 裂缝
 - C. 多孔状岩石孔隙度
 - V. 按含盐量和流体化学成分分类
 - A. 低含盐量：小于 5000 ppm
 - B. 中含盐量：5000 ~ 35000 ppm
 - C. 高含盐量：35000 ~ 100000 ppm
 - D. 超高含盐量：大于 100000 ppm
 - E. 干的
-

电阻率测井要受到孔隙几何形态的影响。比如，用电法测井不容易探测到孤立的、充满流体的孔隙空间 (如地热储集层包含的孤立气泡)。而且，裂缝性岩石的胶结因素与粒间类型岩石不相同。因此，胶结因素的数值很可能作为用测井资料探测裂缝的一种依据。