

煤田勘探 地球物理 测井手册

〔加〕 G.L.Hoffman,
G.R.Jordan
& G.R.Wallis

王玉 赵济 李天保 译

煤炭工业出版社

P631.8

H-324

煤田勘探地球物理测井手册

[加拿大] G.L.霍夫曼 等著

王 玉、赵 济、李天保 译

黄 作 华 校

煤炭工业出版社

内 容 简 介

这是一本专门介绍煤田地球物理测井的实用手册，内容深入浅出，通俗易懂，即使不是从事地球物理勘探工作的煤炭战线的技术人员和工人也都能看得懂，而且反映的是最近几年来煤田地球物理测井中的新技术，故能在勘探工作者和测井工程师之间起到很好的联系和促进作用。

本书第一部分简述了地球物理测井的发展史；第二部分介绍各种测井仪的原理、使用范围，典型的响应曲线，仪器设计、测量单位和刻度，并附有测井实例；第三部分是测井曲线的解释；第四部分是测井方案的规划和执行；附录中附有有关刊物上的文章。本书可供从事煤田勘探和物探的工程技术人员和工人阅读使用，也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

责任编辑：吴志莲

G.L.Hoffman G.R.Jordan G.R.Wallis
GEOPHYSICAL BOREHOLE LOGGING HANDBOOK
FOR COAL EXPLORATION

The Coal Mining Research Centre,
Edmonton, Alberta, Canada, 1982

煤田勘探地球物理测井手册

*

王 玉、赵 济、李天保 译

黄 作 华 校

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本850×1168 $1/32$ 印张9 $1/2$

字数235千字 印数1—2,220

1987年11月第1版 1987年11月第1次印刷

书号15035·2841 定价2.15元

译 者 的 话

地球物理勘探诸方法中，测井是很重要的一种方法和手段。随着微电子技术的迅速发展，地球物理测井也在迅速地改变面貌，并且广泛地采用数字化记录和计算机处理。

为了反映国外在这一领域内的技术发展动向，我们翻译了这本手册。目前国外在地球物理测井方面的著作和文章虽多，但多数是针对石油勘探的，专门面向煤田的地球物理勘探专著还不多见，尤其是为非物探技术人员写的通俗易懂而又内容丰富的手册更属少见。

本书“钻探与取芯”一节由赵贵祥同志审校。由于我们业务水平有限，译文中有不妥之处，敬请读者批评指正。

前 言

近15年来，在世界范围内对煤的需求量迅速增长，这主要是由于钢铁工业使用煤炭量增加的缘故。中东战争导致石油供应波动很大，造成害怕电能短缺的恐惧心理，随之，对动力煤需求增加了。结果使世界各产煤区的勘探活动也相应增加了。

在这种形势推动下，煤田勘探方法和技术水平就得到了发展和改进。井下地球物理测井（以下简称测井）仪的遥感技术发展很最为迅速。现在已有可能应用测井，低成本高速度地调查煤层及其周围地层情况，为耗资高而费时的常规勘探方法提供补充资料。

编写本手册的目的是因为目前有关煤田地球物理测井方面实用的书还很少。尽管要想跟上目前迅速发展的技术水平是困难的，本手册还是力图为在煤炭工业战线上工作的人们反映最新的技术资料。本手册力求以深入浅出的形式使那些不是地球物理学家的人也能了解这些新技术（因为加拿大煤炭工业或政府部门通常雇不到煤田测井解释人员，测井解释工作时常是由地质、采矿和选煤人员分担的）。希望本手册能在勘探工作者和测井工程师之间起到良好的联系、促进作用，并能提高测井曲线的解释质量。

本手册阐述了地球物理测井的基本理论和实践工作，可用于煤田勘探，但不是作为理论教科书构思的。本手册第一部分包括地球物理测井简短的发展史，基本的煤田地质学，以及煤田勘探简单的介绍。第二部分是介绍各种测井仪的原理、使用和其局限性，典型的响应，仪器设计、测量单位和刻度。同时，对影响各种测井装置响应的物理原理也予以说明。为了图解说明测井响应，本手册附有煤田勘探的实际测井曲线。第三部分是关于测井

曲线的解释，叙述了诸如煤层厚度确定和煤质评价等地质问题。
第四部分是有关成功地进行测井勘探的准则。

本手册引用了技术水平有迅速发展的加拿大西部地区的勘探实例，而有关这些实例的原则、用途和解释方法，是可以应用到世界其他各个煤田勘探区的。

目 录

前 言

第一部分 基本情况

1. 加拿大煤田地球物理测井发展史.....	(1)
2. 用于地球物理测井的煤田地质学.....	(6)
2.1 煤的定义.....	(6)
2.2 煤的物理和化学性质.....	(7)
2.3 加拿大西部煤矿床的地质背景.....	(12)
3. 煤的勘探概述.....	(19)
3.1 勘探的目的.....	(19)
3.2 一个典型方案.....	(20)
3.3 钻探与取芯.....	(22)
3.4 钻孔的测井.....	(27)

第二部分 用于煤田勘探的测井设备

4. 常用测井设备.....	(31)
4.1 常用测井探头, 核测井、电测井和其它装置, 组合测井 探头.....	(31)
4.2 数据的记录, 模拟和数字系统.....	(33)
5. 一些基本概念.....	(33)
5.1 探测场.....	(33)
5.1.1 探测深度.....	(36)
5.1.2 垂直分辨率.....	(36)
5.1.3 井眼条件、套管和井液的影响.....	(38)
5.2 标准化、刻度和刻度装置.....	(41)
5.3 影响测井的其它问题, 大气和大地影响、设备故障.....	(42)

6. 核测井仪	(44)
6.1 基础概念：核过程的统计性质	(44)
6.1.1 统计起伏和统计误差.....	(45)
6.1.2 清除统计影响.....	(46)
6.1.2.1 时间常数和测井速度.....	(46)
6.1.2.2 数字化数据的平均.....	(53)
6.2 自然伽马射线测井仪	(53)
6.2.1 原理.....	(53)
6.2.2 典型响应曲线及与其它测井曲线的比较.....	(55)
6.2.3 应用范围及使用的频度.....	(56)
6.2.4 一般仪器设计.....	(56)
6.2.5 测量单位.....	(60)
6.2.6 刻度.....	(60)
6.3 伽马-伽马密度测井仪	(60)
6.3.1 原理.....	(60)
6.3.1.1 电子密度、真密度与康普顿效应.....	(60)
6.3.1.2 密度仪的响应函数.....	(62)
6.3.2 典型响应曲线及和其它测井曲线的对比.....	(68)
6.3.3 应用范围及使用的频度.....	(68)
6.3.4 一般仪器设计.....	(70)
6.3.5 测量单位.....	(71)
6.3.6 刻度.....	(71)
6.4 中子-中子测井仪	(72)
6.4.1 原理.....	(72)
6.4.2 典型响应曲线及其与其它测井曲线的比较.....	(74)
6.4.3 应用范围及使用的频度.....	(76)
6.4.4 一般仪器设计.....	(77)
6.4.5 测量单位.....	(79)
6.4.6 刻度.....	(79)
6.5 中子伽马测井仪	(79)
6.5.1 原理.....	(79)
6.5.2 典型响应曲线及和其它测井曲线的比较.....	(80)

6.5.3	应用范围及使用的频度	(80)
6.5.4	一般仪器设计	(80)
6.5.5	测量单位	(81)
6.5.6	刻度	(81)
7.	电测井仪	(82)
7.1	基础概念, 岩石中的电流	(82)
7.1.1	电阻和电阻率	(82)
7.1.2	视电阻率和真电阻率	(82)
7.1.3	岩性、孔隙度和岩层中的电流	(83)
7.1.4	平原和山麓丘陵煤田电阻和电阻率测井的对比	(84)
7.2	单点电阻测井仪	(84)
7.2.1	原理	(84)
7.2.2	典型响应曲线及与其它测井曲线的比较	(86)
7.2.3	应用范围及使用的频度	(87)
7.2.4	一般仪器的设计	(87)
7.2.5	测量单位	(87)
7.2.6	刻度	(87)
7.3	电位电极系电阻率测井仪	(88)
7.3.1	原理	(88)
7.3.2	典型响应曲线及与其它测井曲线的比较	(90)
7.3.3	应用范围及使用的频度	(90)
7.3.4	一般电位电极系电阻率测井仪的设计	(91)
7.3.5	测量单位	(92)
7.3.6	刻度	(92)
7.4	聚焦电阻率测井仪	(92)
7.4.1	原理	(92)
7.4.2	典型响应曲线及与其它测井曲线的比较	(93)
7.4.3	应用范围及使用的频度	(94)
7.4.4	一般仪器的设计	(96)
7.4.5	测量单位	(96)
7.4.6	刻度	(96)
7.5	产状仪	(96)

7.5.1	原理.....	(96)
7.5.2	典型响应曲线.....	(97)
7.5.3	应用范围和使用的频度.....	(97)
7.5.4	一般产状仪的设计.....	(97)
7.6	自然电位测井仪.....	(99)
7.6.1	原理.....	(99)
7.6.2	典型响应曲线及与其它测井曲线的比较	(101)
7.6.3	应用范围和使用的频度	(101)
7.6.4	一般自然电位测井仪的设计	(103)
7.6.5	测量单位	(103)
7.6.6	刻度	(103)
8.	其它测井仪	(104)
8.1	声波测井仪	(104)
8.1.1	原理	(104)
8.1.2	典型的声测井响应曲线及与其它测井曲线的比较	(108)
8.1.3	应用范围和使用的频度	(108)
8.1.4	一般声测井仪的设计	(109)
8.1.5	测量单位	(110)
8.1.6	刻度	(110)
8.2	井径仪	(111)
8.2.1	原理和应用范围	(111)
8.2.2	一般井径仪的设计	(111)
8.2.3	测量单位和典型响应曲线	(113)
8.2.4	刻度	(113)
8.3	井眼方位仪 (井斜仪)	(113)
8.3.1	原理	(113)
8.3.2	典型的响应曲线	(115)
8.3.3	应用范围和使用的频度	(115)
8.3.4	一般仪器设计	(116)
9.	用于其它工业的测井仪	(116)
9.1	感应测井仪	(116)
9.2	温度测井仪 (井温仪)	(117)

9.3 泥浆导电率测井仪 (井液电阻计)	(117)
----------------------------	-------

第三部分 煤田地球物理测井的定量解释

10. 煤的岩性参数的解释	(118)
10.1 煤的描述	(118)
10.2 煤的煤岩类型	(118)
10.3 煤层中的灰分	(121)
10.4 煤层中的水分	(123)
11. 基本煤层的测定	(127)
11.1 煤层和钻孔的定向	(127)
11.2 确定煤层和岩石带的厚度	(128)
11.2.1 零点偏移效应	(128)
11.2.2 确定煤层厚度的方法	(130)
11.2.3 确定夹石带厚度的方法	(140)
11.3 确定岩芯损失	(141)
11.4 确定采样间距	(143)
12. 地层与沉积岩的解释	(145)
12.1 岩性特征	(145)
12.2 沉积特征	(146)
12.3 层间地层的对比	(150)
12.4 煤层的详细对比	(152)
13. 构造解释	(155)
13.1 断层	(155)
13.2 褶皱	(155)
14. 交会图技术	(157)
15. 计算煤层中间地层的孔隙度	(158)
15.1 从声波测井曲线计算孔隙度	(158)
15.2 从密度测井曲线计算孔隙度	(160)
15.3 从中子测井曲线计算孔隙度	(160)
15.4 孔隙度测井的交会图	(162)
16. 煤质的确定	(169)

16.1	分析和计算的方法	(169)
16.2	分析时对地球物理测井曲线的要求	(172)
16.3	这些方法的精度及其应用	(173)
17.	土工技术的研究	(174)
17.1	在土工技术中当前的应用	(174)
17.2	煤层的顶板和底板条件	(175)
18.	计算机的应用	(176)
19.	总结, 目前的技术发展水平和新动向	(177)
第四部分 一个地球物理测井方案的规划和执行		
20.	规划一个地球物理测井方案	(179)
20.1	规划一套合适的测井装备: 常用的下井仪和测井装备	(179)
20.2	测井格式	(180)
20.2.1	选择垂直深度比例尺	(180)
20.2.2	线性和非线性响应的比例尺	(180)
20.2.3	承包商的标准格式	(181)
21.	测井方案的实施	(186)
21.1	野外测量和测井图头信息	(186)
21.2	将测井仪与地面对零; 电缆打滑	(187)
21.3	通过钻杆测井	(189)
21.4	防止下井仪器丢失的措施	(189)
21.5	下井仪的打捞技术	(190)
22.	地球物理测井的总体策略	(191)
22.1	承包的选择方案	(191)
22.1.1	优点和缺点	(191)
22.1.2	测井承包的价格	(192)
22.1.3	典型的测井承包	(192)
22.2	购买设备的选择方案	(194)
22.2.1	优点和缺点	(194)
22.2.2	投资资本和操作费用	(195)
23.	政府法规	(195)
23.1	联邦政府的法规	(195)

23.2 省政府的法规	(196)
23.2.1 艾伯塔省 (Alberta)	(196)
23.2.2 不列颠哥伦比亚省 (British Columbia)	(197)
23.2.3 萨斯喀彻温省 (Saskatchewan)	(197)
附录	(198)
A. 有关刊物文章的副本	(198)
1. 测井在采煤和岩石力学方面的应用	(198)
2. 一种评价原地沉积煤的理论方法	(215)
3. 一种在现场的煤质预测技术	(233)
4. 从机械特性测井曲线来计算地层强度	(245)
B. (略)	(272)
C. 术语汇编	(272)
D. 测井方案的设计	(280)
E. 参考文献	(281)

第一部分 基本情况

1. 加拿大煤田地球物理测井发展史

1928年8月法国的康拉德·斯伦贝谢 (Conrad Schlumberger) 首次进行了煤田地球物理测井作业。图 1.1 表示了当时所使用的设备类型。产生的测井曲线是与目前电阻率测井曲线相似的



图 1.1 加拿大斯伦贝谢公司提供的一幅早期测井作业照片

一种电阻率测井曲线（据Allaud和Martin, 1977年）。

随后，在世界各个地区的煤田勘探中偶尔也进行过这种测井作业，不过只是用来解决一些专门问题的。在北美，还是到60年代中后期才应用这种井下物探方法作为常规煤田勘探的手段，并且研制出产生各种测井曲线的新技术和设备，开始用于油气田的勘探。但在普遍用于煤田勘探以前，还必须设计出用于小口径钻孔的井下仪。

1965年前后，将测井方法用于煤田勘探已经逐步普及，煤田勘探者开始应用通常用来调查地下水的电阻率测井方法。后来发现，在某些地区，可根据煤层电阻率高的性质来识别它；可是其它一些地区，砂岩电阻率也很高，以致难以将它们与煤相区别开。这个问题在有了伽马射线测井仪后得到了解决。伽马测井仪可以测量岩石地层产生的自然伽马辐射。这样，勘探工作者就可以通过伽马测井曲线与电阻率测井曲线的比较来识别岩性和判定煤层间距。

1954年德莱塞·阿特拉斯（Dresser Atlas）公司首次将密度测井仪应用于石油工业，而将密度测井仪开始用在煤田勘探是在60年代后期。因为与几乎所有其他各种岩石相比，煤的密度是非常低的，所以根据密度测井能较为容易地识别煤层。通过将密度测井曲线与电阻率、电阻和伽马射线测井曲线相比较，可以分辨出岩性的各种差异。由于密度测井仪的响应曲线受不规则井眼条件影响很大，在常规的地球物理测井系列中很快地又增加了井径测井来记录钻孔直径的变化。

早在50年代初期就已经把中子测井用于油气田勘探，在60年代初期开始用于煤田勘探。在遇到象加拿大西部下白垩纪山麓丘陵和山区（书中后面所提山麓丘陵和山区均指加拿大西部地区）的煤田中那种砂岩电阻率很高的情况下，用电阻率和电阻测井曲线进行解释感到困难时，中子测井曲线就显得很有用处。因此，对于平原煤区（本书后面所提平原煤区均指加拿大中部地区）的勘

探来说，使用一套包括密度、单点电阻、伽马射线和井径的测井方法；而在山麓丘陵煤矿区，则用中子测井取代单点电阻测井法。

过去，只是根据这套测井曲线的信号特征来确定煤层和夹层的分界，而没有认真地利用这些测井曲线来对煤层及其围岩的物理参数作定量分析。

在70年代初期，加拿大西部地区的所有省政府立法规定要用测井曲线作为地质报告的基础。结果是在加拿大西部各个煤区至少都进行了一些测井工作。

70年代初煤炭市场的情况，使得以地球物理方法作为一种勘探技术的压力增大了。日本钢铁界需要供应冶金用煤，加拿大西部冶金用煤区与其他国家在竞争煤的出口市场。加拿大西部山麓丘陵地带冶金用煤区的构造复杂，要完整地回收钻探岩芯是困难的。由于在取芯过程中常常丢失大量煤样，所以需要一些新的方法来确定煤层的性质。

测井承包商开始设计专门用于煤田勘探的测井仪和测井方法。在加拿大西部煤田中，这种方法首先来自BPB仪器公司和加拿大斯伦贝谢公司，随后是洛克石油实业公司、世纪地球物理公司和其他公司。

70年代初，应壳牌公司和其它公司的要求，BPB仪器公司研究了专门用于煤田勘探的高分辨密度仪的测井响应，并首先用于欧洲和非洲。不久，又用于加拿大、澳大利亚和美国。加拿大西部冶金用煤矿区很快应用来解决山麓煤层的地质不定性问题。接着又在加拿大平原地区的动力用煤矿区推广应用了这种高分辨测井法。

70年代中期，BPB开始用盒式磁带机记录测井资料，并可以用任意要求的比例将磁带记录回放复制。用这种磁带机，BPB可以直接从测井曲线来定量分析与煤层灰分、煤层厚度及岩石厚度等有关的参数。这些确定煤质参数的早期的尝试，推动了进一步

提炼采集数据的需要；各煤田勘探公司要求知道各煤层的性质、厚度和煤质，特别是在取芯过程中丢失的材料。

同时，BPB研制了比过去所有密度测井仪有更好分辨能力的密度仪，并将几种测井仪组合成单个探头来完成过去需要多次才能完成的测井作业，从而缩短了作业时间。

1969年，斯伦贝谢公司研究出一种由测井曲线来计算某些煤质参数的方法（1971年Bond等人，见附录A）；1973年，该公司根据在油气勘探区使用的结果，公布了一种确定岩石强度的方法（1973年Tixier等人，见附录A）。

1976年，洛克石油实业公司研究出对垂向有高分辨能力的、用于煤田勘探的多极聚焦电阻率测井仪。该公司第一台煤层测井仪聚焦为20厘米，即对20厘米宽度具有完整的全分辨能力。由于地层内含水量、煤类型和岩石夹层岩性等的变化影响电阻率的测量，所以此种仪器并不总是被接受的，而且对于复杂测井响应曲线的解释工作还需要有一定的经验。

洛克公司在1978年公布了一种煤的理论分析方法（1978年Edwards和Banks，见附录A）。这个方法分析出的灰分和热量值保持在和实验室内确定的平均值相差2%和400Btu（英制热量单位）以内。1978年，洛克还研制了一种聚焦宽度为5cm的7电极聚焦电阻率仪，可分辨只有5cm厚的地层单元。这种测井仪对精确地确定煤层内薄的岩石夹层是特别有效的。

自1976年以来，各主要测井承包商使用的密度测井仪已广泛配用计算机。其目的在于减小统计误差、提高分辨能力和使准确地进行定量测定成为可能。

1980年，世纪地球物理公司将自1974年以来一直用在美国的一套测井系统引进加拿大。这套仪器包括一台小型车载计算机和一个可同时产生伽马射线、密度、聚焦电阻率、井径测井曲线的单探头装置。该计算机在野外就能确定出煤质参数数据（1980年Norris和Thomas，见附录A），但只在加拿大西部进行过有限