

试 用 教 材

现代煤田测井技术

黄智辉等 编译

专

武汉地质学院地下物探教研室

一九八三年四月

目 录

1. 地球物理测井在煤田地质勘探中的应用(代序)(黄智辉).....	(1)
2. 岩石物理测井在评价煤矿床中的应用 (R.W.C.布拉姆F.德里厄登克斯)(黄智辉译).....	(4)
3. 测井在煤矿和岩石力学中的应用 (L.O.邦德 R.P.阿尔杰A.W.什米德特)(黄智辉译).....	(22)
4. 用地球物理测井评价煤层(W.H.弗特尔 M.R.德弗里厄斯)(黄智辉译)....	(38)
5. 地球物理测井在煤矿开发中的应用 (J.凯韦尔斯基W.H.弗特尔)(黄智辉译).....	(77)
6. 评价原生煤层的理论方法(K.W.爱德华兹 K.M.班克斯)(黄智辉译).....	(88)
7. 莫斯科盆地煤田钻孔的无岩芯钻进(B.H.鲍依达钦科等)(蔡柏林译).....	(104)
8. 各种不同等级煤的电阻率与热阻率之间的关系 (J.R.凯耶尔·A.什里斯托费尔)(黄智辉译).....	(108)
9. 根据电阻率和伽玛测井曲线的组合估计煤层灰分含量的方法 L.K.(J.R.凯耶尔戴斯)(黄智辉译).....	(112)
10. 极高分辨率煤田密度测井技术(K.W.非舍尔 R.梅耶)(黄智辉译).....	(119)
11. 根据测井资料确定地层的强度参数(J.凯韦尔斯基)(黄智辉译).....	(133)
12. 根据声波测井(AK)资料确定煤层围岩的强度 (B.H.帕谢奇尼克Э.П.伊文佐夫)(蔡柏林译).....	(153)
13. 倾斜放射性地层伽玛测井曲线的反褶积(J.G.科纳瓦)(李大心译).....	(155)
14. 非金属矿床的测井评价(M.P.蒂克瑟 R.P.阿尔杰)(黄智辉译).....	(162)
15. 利用测井曲线形态进行沉积岩石学的研究(S.J.皮尔森)(黄智辉译).....	(186)
16. 根据测井曲线鉴定沉积环境(D.R.艾伦)(黄智辉译).....	(202)
17. 得克萨斯始新统砂体的几何形态和褐煤的赋存(摘要) (W.R.卡瑟J.E.詹斯顿W.N.巴哈)(陈曜岑译).....	(216)
18. 测井信息对沉积学和地层学的贡献(O.塞拉 H.T.艾博特)(李大心译).....	(222)

1. 地球物理测井

在煤田地质勘探中的应用

(代序)

从一九三一年法国首次在煤田钻孔中运用电阻率测井划分煤层算起,到现在世界煤田测井已有五十多年的历史了。自一九五四年我国建立第一支煤田测井队伍到今天,我国的煤田测井也已经历了近三十个春秋了。

通观国内外煤田测井发展的进程可以看出,七十年代以前和七十年代以后的煤田测井,无论在数量上或质量上,也无论在应用的深度上或广度上都有着明显的不同。七十年代以前的煤田测井基本上仅是检验钻探取芯结果的一种手段,其主要任务是在钻孔剖面上划分煤层,确定煤层的深度和厚度。七十年代以来,作为重要能源资源的煤炭,重新受到世界各国的高度重视,例如在美国,煤炭已被公认为本世纪后五十年最丰富、最可靠的能源资源;加之又有先进的石油测井技术可以作为借鉴,因此煤田测井得到了前所未有的巨大发展。现代煤田测井除了已实现测井仪器的刻度化、组合化、轻便化,采用数字技术和电子计算机进行测井数据的收录和处理等之外,在测井资料的应用方面的突出特点则是远远超出了仅在单个钻孔中对煤层进行分层、定厚的狭小范围。现在,测井资料从煤田的普查、预测到勘探直至开采设计,都有着广泛而有效的应用。

归纳起来,现代煤田测井已有效地应用于以下八个方面:

1. 鉴定沉积环境

煤的形成和发育,无不受着一定的古地理沉积环境的控制。聚煤盆地的古地理沉积环境不仅决定了含煤岩系的岩性组合、岩相的类型及其变化规律,而且也决定了煤层发育的一般地段和富集地段的位置。因此,研究沉积环境对于开展战略性的煤田普查和预测具有重要意义。

在鉴定沉积环境中,砂体的粒度、分选性及泥质含量的变化,是三项重要的指标。测井曲线(尤其是电阻率曲线、自然电位曲线和自然伽玛曲线)不仅能区分不同岩性的地层,而且还可以有效地反映出这三项指标的变化情况,所以利用测井曲线可以为鉴定沉积环境提供重要的依据。

近年来,地层倾角测井资料作为沉积环境和砂体型式的一种信息源已为人们所公认。在国外,高分辨率地层倾角测井资料与电测井或其他测井曲线的配合使用,在鉴定地层和沉积环境中几乎被认为是不可缺少的了。

利用测井资料还可以作出区域的含砂率图、纯砂岩图及最大砂层图,这些图件能清晰地反映出砂体的几何形态及其与煤层赋存形态之间的相关关系。一旦掌握了这种相关性,便可

以根据它们来预测富煤区域的位置，从而指导钻孔的布置和勘探设计。在这方面，得克萨斯州始新统的褐煤勘探已经提供了很有价值的成功经验。

2. 确定煤层的深度和厚度

确定煤层的深度和厚度是煤田测井的常规性任务。目前解决这一任务的主要问题是提高分层的精度。

密度测井曲线是划分煤层的主要测井曲线。在国外，依于分层精度的不同，一般将密度测井分为三种类型：

长源距密度测井（LSD），源距为40—50厘米，边界分辨率为20厘米左右。

高分辨率密度测井（HRD），源距为20—24厘米，边界分辨率约为10厘米。

层分辨率密度测井（BRD），源距为8—15厘米，边界分辨率为5厘米左右。

为了进一步提高密度测井的分层精度，基尔哈特—欧文公司研制出了使用低能量、高辐射输出量放射源的极高分辨率密度（EHR）测井仪，其边界分辨率可小到3厘米。

3. 煤质分析和岩性分析

利用数字技术和电子计算机对密度测井、声波测井、中子测井等测井曲线进行数字处理，可以获得有关煤质指标（如含碳量、挥发分、灰分、水分、发热量等）和岩石组分（如砂、泥的体积百分含量和孔隙度）的定量分析结果。能够进行煤质分析和岩性分析，这是现代煤田测井的重要特点之一。进行煤质分析和岩性分析的方法有两种，即体积模型法和数理统计法。

许多外国测井公司都采用体积模型法来进行煤质分析和岩性分析。这种方法是将复杂的煤层（或岩层）简化成具有不同物理性质的几部分，而测井响应则是这几部分的贡献之和。按照这种方法，可以得到煤层（或岩层）的等效体积模型，并推导出各种测井方法的解释公式，即测井物理量与各种地质参数之间的关系式。这些解释公式大都是线性方程式。利用电子计算机来求解这些线性方程式，便可以得到各种煤质指标（或岩石组分）的定量分析结果。

近年来，在煤田测井资料的数字处理中，数理统计法得到了越来越广泛的应用。数理统计法，又称概率统计模型法，它把煤（或岩石）的各种性质和测井物理量均作为随机变量，并用概率统计学的方法来研究它们之间的关系，最后用数学表达式或图表形式把这种关系表现出来。在现代煤田测井中已经用方差分析来解决测井曲线的分层问题，用回归分析来确定煤的灰分、挥发分以及发热量等质量指标，用判别分析来区分煤和炭质页岩，用相关分析来进行测井曲线的对比，等等。

比较起来，体积模型法的优点是方法简单，通用性强；不需要复杂的数学推导便能得到测井解释公式，而且这些解释公式大都是线性方程式，它们特别适宜于使用电子计算机进行求解。从本质上说，体积模型法是把复杂的实际问题简化成孤立的特征问题来求解的，一些重要的地质因素（如岩石的粒度、分选性，煤的不同显微组分等）及测井影响因素，由于它们没有明显的测井物性差异或所占比例甚小而被忽略了。所以，体积模型法仅是一种近似的研究方法。数理统计法则是面对实际的复杂问题进行研究，它考虑了体积模型法所不能考虑的实际因素，但这种方法必须以足够数量且有代表性的实验室分析结果作为依据，这就必然导致其结果带有地区的局限性。

4. 确定煤的级别

由于火成岩的侵入使煤的级别逐渐增高（即变质程度加深）时，各种测井曲线会产生相

应的变化，如煤的变质程度越深，伽玛—伽玛曲线的幅值会越小（密度增大），中子曲线会逐渐降低（含氢量减少），电阻率也会相应下降，等等。因此，利用诸如密度—电阻率或密度—中子交会图板，便可以有效地判断煤层的级别。

5. 计算洗煤产率

利用密度测井曲线可以预测煤的可洗性，即在预定的某种特定比重条件下洗选原煤时的产率。壳牌公司和BPB公司在这方面都已有成功的经验。

6. 确定地层的强度特性

研究岩石的强度特性，这对于煤矿的矿井建设和开采具有重要意义，尤其是煤层顶底板的强度特性，它将直接关系到开采方案的设计和矿井支护方案的选择。利用声波测井和密度测井资料可以较准确地提供出岩石的各种动态弹性模量，即杨氏模量、切变模量、体积模量和泊松比。

7. 进行地层对比及勘探区的评价

利用测井资料进行地层对比和区域性的综合分析研究，可以得到煤层对比图、覆盖层等厚线图、全部煤层或可采煤层的等厚线图、等灰分线图、顶底板等高线图等成果图件，这些资料对于勘探区的评价以及开发设计都是极为有用的。

8. 计算声阻抗与合成地震记录

利用测井资料计算出的声阻抗曲线和人工合成的地震记录，可以研究合成的反射波组与相应的地层之间的关系，提供目的层反射波的存在及其波形特点，从而提高地震资料的解释水平。

由以上所述不难看出，现代煤田测井在煤田的普查、预测、勘探以至开发设计中都有了成功的应用。可以预见，随着测井仪器设备的不断改进和更新、数字技术水平的不断提高，煤田测井在整个煤田地质勘探中必将占有越来越重要的地位。

为了使我国煤田测井在一个不太长的时期内达到世界先进水平，使它在我国煤田地质勘探中发挥其应有的作用，我们特选译了这本论文集，以供大家学习和工作的参考。由于编译时间仓促，文中定有不妥甚至错误之处，敬希读者指正。

在本书选材过程中，地质矿产部物化探局及其所属第一物探大队 101 测井队，曾给我们提供了许多文献资料。在此特向他们致以谢意。

黄锦辉

一九八三年四月 于武汉

2. 岩石物理测井 在评价煤矿床中的应用

R·W·C·布拉姆 F·德里厄登克斯

提 要

本文是壳牌公司在世界不同地区的煤勘探工作中应用测井评价技术的一个评述。

文中简要地叙述了几种新研制的测井仪，讨论了测井定性解释和定量解释的不同实例。

测井定性解释包括煤层的鉴别和对比，探测火成岩侵入体及其对煤的影响，确定一般覆盖层的岩性以及描述煤的风化特征。

根据岩芯资料建立起来的测井数据与煤质参数之间的相关关系，通常仅对某一特定的沉积地区才是有效的。由于煤的类型和变质级别的重大变化，这种测井—岩芯相关关系的使用甚至常常被局限于单个煤田的部分地区。然而，低水分含量烟煤的一些实例表明，应用源距较短（0.25米）的中子测井仪能够鉴别这些变化。测井仪的这种鉴别能力使对照岩芯资料进行校准之后，利用测井曲线精确确定主要煤质参数，即灰分含量，挥发物及热值成为可能。

本文还讨论了某些研究情况，包括硫测井，利用电阻率测井确定低变质煤的水分含量，煤层围岩地层的硬度/强度与它们的测井响应之间的相关关系。

前 言

自从1973年以来，壳牌公司一直在煤炭勘探方面积极地进行着大胆的尝试。在这些工作领域中，煤—岩石物理学正起着越来越重要的作用（拉弗斯（Lavers）和史密茨（Smits），1977）。与早期的发展情况相比，在较近时期内，新一代钻孔测井仪和更好的刻度技术的引进，使测井资料的准确性有了显著的改善。

现在，在所有的工作地区，岩石物理学正成功地控制着测井定量解释技术的建立。根据测井读数与常规煤芯分析的对比，可以得到经验的相关关系，在无岩芯钻孔中使用这种相关关系则可预测被穿过的煤层的煤质。但是，这种相关关系既不是简单的，也不是唯一的。这是因为，分析的煤质参数（如水分、灰分含量、挥发物和热值）均取决于煤样的复杂的化学组分和物理组分，而利用测井方法在现场测得的一些物理参数（如密度、含氢指数、自然放射性）是不可能直接确定这些组分的。因此，这些相关关系的适用性具有相当多的地区特点，而对它们的有效性则不得不进行普遍的检验。例如，只有在煤的类型、伴生矿物类型、水分含量以及煤的变质级别（煤化程度）的变化使得有可能在用户指定的精度范围内预测出

灰分时，灰分—密度相关关系才是可应用的。

近来，在测井定量评价方面业已取得了重要的进展。野外研究已经说明，只要煤的灰分含量在25%以下，采用短源距（源距为0.25米）中子测井仪得到的测井曲线就能够鉴别出煤的类型和煤的变质级别的变化。所以，根据测井曲线能对灰分含量、挥发物甚至煤矿床的热值作出准确的计算，该煤矿床由于火成岩侵入体的影响而局部提高了级别。这种情况仅适用于变质级别高的煤（烟煤以及级别更高的煤），其原因在于，对于变质级别高的煤来说，水分含量对煤质是没有影响的。

变质级别低的煤（褐煤和褐色煤），具有高的水分含量，为了预测它们的煤质则需要使用不同的方法。例如，根据现场密度变化将很难反映出纯褐煤矿床的内在灰分含量的变化，然而根据自然伽玛放射性却能准确确定其内在灰分含量的变化（克鲁斯特曼（Kloosterman），布鲁姆（Brom）和兰法特（Lonfat），1977）。在全面评价褐煤矿床中，煤的原始水分含量本身就是一项非常重要的参数。通常，这一参数的确定是困难的，因而它成为科学研究的一个课题。

对于各种变质级别和类型的煤来说，有关硫含量的学识是极其重要的，因为在煤的利用过程中硫会产生有害的影响。壳牌公司与加拿大地球物理公司合作进行的研究结果证明，至少在低氯浓度情况下，确定原生煤的硫含量是可能的。眼下，该确定方法的缺点是仪器的直径太大，有0.1米（4英寸）和工作成本过高。

倘若煤的精选受到重视，就需要有关洗选不同比重煤时所得品种和产量方面的资料。我们利用源距非常短的（0.15米）密度测井仪的响应，在预测洗煤产量方面取得了有价值的成果。这一应用为帮助选择最佳开采层位提供了更多的资料。

遍及整个含煤岩系的测井，还可以对矿山勘探阶段的可行性提供有效的地质技术和工程技术方面的资料。现在，壳牌公司的研究目的是建立测井读数与岩石强度之间的定量关系。

下面将简要叙述常用的测井仪器，介绍煤田测井的一些定性和定量解释实例，最后将叙述在煤的岩石物理学方面的某些研究情况。

测井仪器

英国测井公司在与壳牌公司以促进研究、发展和改善操作过程为目的交换了意见之后，提供了服务。一般用于壳牌煤炭公司的测井仪器设备列于表I。

煤组合测井仪（CCS）*是标准的煤勘探测井仪，它在提供所钻岩层的最主要信息方面极为有效。这个测井仪能够进行四种测量：自然伽玛（GR），长源距密度（LSD），层分辨率密度（BRD）和井径。所有这四种测量都是同时完成的，这对于极大地提高工作效率是重要的。开动探头的偏心装置并瞄准伽玛射线物来进行各密度探头的测量，以减小探头对钻孔影响的灵敏度。除层分辨率密度外，探头的所有功能都被计入标准刻度之中，然而层分辨率密度则可以相对于长源距密度的响应进行间接的刻度。

第三种密度测井仪—高分辨率密度（HRD）是早期煤田测井仪的一种继承。两点刻度系统的引进，使得可以成功地使用这种测井仪来预测煤质。由于井壁层分辨率密度测井仪的最新改进，现在它已兼有极高的分辨率和准确的密度测定这两个方面，所以，HRD已经几

*请参看：术语表。

乎失去了它的重要性。

中子测井仪备有三种不同的源距类型：

——长源距中子中子 (LSNN) 是承包者的标准中子测井仪。这种中子测井仪能够很好地鉴别出一般含煤层序中出现的各种岩石类型。但是，在高含氢指数 (I_H) 范围内，它的灵敏度却是低的。结果，使它对粘土和煤之间以及不同类型煤之间的鉴别能力变得很差。

——短源距中子中子 (SSNN) 是为了改善上述鉴别能力而研制出来的。所使用的源距为 0.25 米，它兼有 LSNN 的所有特点并且改善了垂向分辨率，在整个高 I_H 范围都提高了灵敏度。

——零源距中子中子 (ZSNN) 的放射源装置在正对探测器中心的位置上，结果使放射源至探测器的距离在垂向上等于零。到现在为止，零源距中子中子还仅制造了工程技术的样机，并正在进行试验。

没有列入表 I 中的是中子伽玛探头 (NG)，它可以由其他测井仪组合而成，例如，将 HRD 的伽玛探测器与 LSNN 的中子源相结合，便构成中子伽玛探头。

定性解释

在此标题下的测井曲线主要是作为地质手段来使用的，它主要可分为现场解释和重查解释。

现场解释是在井场指导收集最佳的地质资料，其典型例子是：

- 按照深度坐标利用测井曲线进行钻孔岩芯和岩屑的描述。
- 确定丢失岩芯的数量并鉴定丢失的物质。
- 选择煤层井段以采取煤质化验样品。

现场解释要求迅速具备可用的测井资料，这些资料是由承包者以现场打印形式提供的。

重查解释的目的在于，根据勘探区内所有钻孔测井资料之间的相互关系，建立起煤矿床的地质模式，其典型例子是：

- 进行地层对比以解释地质构造。一般地说，各种测井曲线都能有助于成功地进行地层对比。如果对比是不可靠的，那么解决对比问题的详测曲线在整个煤层层段上的特征就会呈现指纹状。
- 研究煤层的发育情况。利用整个煤层上的详测曲线，例如用 1:20 深度比例记录的曲线，可以使这一研究大大简化。

在以上解释中，地质工作者主要注意的是识别测井曲线的类型。在下面的定性解释中，为了解释测井的读数，则需要对测井仪有基本的了解。

——风化作用研究：

根据图 1 所示的煤层风化特征，可以得到确定煤层风化程度信息的方法。一旦确定了未风化煤层的电阻率曲线的类型，便可以根据未风化煤层与所研究煤层在电阻率方面的差异来推断出煤层的风化程度。

——岩性研究：

使用自然伽玛 (GR)、短源距中子中子 (SSNN)、聚焦电阻率 ($F \cdot E \cdot$) 和长源距密度 (LSD) 曲线的组合，可以鉴别含煤岩系中的大多数岩石类型。但是，将基本解释规则应用于两种曲线组合的快速研究方法，一般即可充分地解释岩性。最有鉴别力的两种曲线组合

是自然伽玛 (GR) — 中子中子 (NN) 和自然伽玛 (GR) — 密度组合。

在地质模拟中特别重要的是鉴定侵入体 (粗玄岩岩脉和岩床) 及识别已受热效应严重影响的煤层。一般地说, 识别侵入体是不成问题的, 因为侵入体具有突出的极低 GR、高 NN 计数率、高密度和高电阻率。识别受到侵入体严重影响的煤层也是不成问题的, 例如对“已燃烧”的煤, 根据它的特别低的电阻率就可以很容易将它识别出来。但是, 在天然焦与未受侵入体影响的煤之间, 存在着不同脱去挥发作用程度的整个变化范围。图 2 是如何能识别它们的示意图。中子响应在这方面尤其具有非常明显的特征。在下一部分中我们将更详细地讨论这一点。

定量解释

在煤的勘探/圈定边界时期, 可以区分出两个主要的勘探目的:

1. 建立一个三维的煤矿床模型, 以便精确进行储量计算和开采工程研究。
2. 为了煤的利用和销售, 要确定出关于煤类和煤质的全部数据。

就定量的意义来说, 测井对准确提供煤层的深度和厚度以建立地质模型是有帮助的。然而, 更重要的定量解释则是指导评定煤质。

图 3 和图 4 表明, 在同一地区的两个不同的煤田上, 灰分含量与 HRD 响应是如何的直接相关。这样的相关关系常常适用于整个煤矿床。然而在多层沉积的情况下, 有时可以根据每一单层煤层建立的相关关系来改善其预测精度。上述两个实例表明, 对于低灰分煤和高灰分煤来说, 所得灰分的精度一般都很好地保持在 10% 相对值范围以内。

另一个重要的煤质参数是挥发物 ($V \cdot M$), 其数值是在某种特定条件下释出的气态产物的重量百分比。氢总是这种气态产物的一部分, 如果氢以固定的比例构成 $V \cdot M$ 含量的一部分, 那么根据中子测井仪测出的氢含量也就能确定出 $V \cdot M$ 含量了。早期的中子 — $V \cdot M$ 相关关系的试验表明, 标准中子测井仪的灵敏度是不够的。

减小源距能够提高中子测井仪对整个高 I_H 区域 H 含量变化的灵敏度, 图 5 即可说明这一点。图 5 表明了 SSNN 测井仪能够作出怎样的含氢量断面图。 H 的含量的变化是由于煤的有机组分 (通常所说的显微组分) 的变化而引起的。富氢区域含有许多镜质体, 而惰性体则是低氢部分的主要组分。图 6 表明, 中子响应与 $V \cdot M$ 含量之间具有多么好的相关关系。在该图中, 根据中子测井读数可以把属于同一个煤田的三个煤层清楚地区分开来。这三个煤层在 $V \cdot M$ 含量上的差别是由它们的显微组分不同造成的。

图 7 提供了另一个实例。在这里, 挥发物的差异已知是由显微组分类型的不同和脱去挥发分现象所致。该图上的 23 个钻孔数据的散布, 可以认为是由 SSNN 的刻度方法不能令人满意的结果。近来采用了两点刻度系统, 使这方面得到了显著的改善。对着 $V \cdot M$ 含量大约是 30% 的煤层所出现的中子计数率的极低值 (图 7), 可以解释为是强中子吸收剂造成的结果, 这种强中子吸收剂常常与藻浊煤有关。正如在图 8 上所看到的那样, 通常可以根据中子伽玛曲线上较高的伽玛射线计数率来查明这种“中子吸收体”的存在。

指出下面这一点也是有意义的, 图 3 和图 7 的全部煤质数据系取自相同的一些煤样。这就意味着, 煤的类型和变质级别的改变是造成图 7 上所看到的 $V \cdot M$ 含量变化范围的主要原

因,而煤的类型和变质级别对图3所示灰分—密度测井相关关系则没有显著的影响^{*}。没有理由指望根据测得的测井曲线能够直接得到煤的热值($C \cdot V$)。但是有幸的是,煤的 $C \cdot V$ 一般都与其他煤质参数,例如灰分或灰分和 $V \cdot M$ 的组合有关,而后两者用测井曲线都能求得。这种情况如图9所示,图中 $C \cdot V$ 对灰分的相关关系是按无灰基表示的不同 $V \cdot M$ 含量等级绘出的。在这种特定的情况下, $V \cdot M$ 等级的划分考虑到了整个矿床上煤的变质级别和类型的变化。例如,A组煤的 $V \cdot M$ (无灰基)低于25%且 $C \cdot V$ 较高,它主要是受热使级别增高的煤;同样,E组煤的 $V \cdot M$ (无灰基) $\approx 41\%$,富含镜质组因而呈现出高的 $C \cdot V$ 。

图10表示测井定量解释的另一种类型,它说明了对煤的可洗性的预测,也就是在某种特定比重条件下预测洗选原煤物质时的产率。根据象BRD那样具有高垂向分辨率的密度测井仪的响应,显然可以最好地预测煤的可洗性。该实例表明,用相对于高分辨率密度(HRD)刻度的BRD,可以获得相应于特定比重($S \cdot G$)为1.45和1.6的BRD基准计数率。这样,将所有低于所给特定比重1.45的测井曲线层段相加求和,便确定出在特定比重1.45条件下的累加浮选值。为了计算重量产率,可将由图所得的累加浮选值除以层段总厚度并乘以相应于平均浮选密度与平均煤层密度比值(1.4/1.5)的加权因子。该孔预测出的产率就是采用类似的方法算得的。

所计算出的结果与实际可洗性资料的对比吻合得很好(绝对误差范围大约为5%)。当煤层中的夹矸很薄(小于0.1米)时,BRD的分辨率将太低而不能保证其预测的精度。对于这种结构的煤层,十分需要使用新近研制出的微电阻率测井仪(其垂向分辨率大约是0.015米)来提供辅助的资料。

利用测井曲线目前尚不能常规地获得另外两个重要的煤质参数:主要与低变质级别煤有关的水分含量以及硫含量。在下一部分的其他专题中,我们将概述关于这两个参数的研究情况。

煤的岩石物理学研究

壳牌公司在煤的岩石物理学研究方面的早期工作,主要是分析“第一代”测井仪的响应,例如伽玛密度和中子测井仪,它们都比较简单(没有聚焦装置,也没有贴壁装置),因而容易受到相当大的钻孔影响。某些钻孔校正是可以计算出来的,例如计算偏心及地层密度对伽玛响应的影响。由于在煤质评价中连续区分薄层较为重要,所以也研究了密度测井仪的垂向分辨率问题。在理论上研究了对煤层煤质变化反映不灵敏的LSNN测井仪的响应之后,提出了设计“零距离”中子测井仪的建议,后者目前正在野外进行试验。

更新的研究是致力于研制评价原生煤煤质的新仪器和新方法。我们与加拿大地球物理公司合作,用二次中子伽玛射线能谱对硫测井的可能性进行了广泛的野外试验。所用的测井仪装有一个50微克的钷-252中子源和一个 0.08×0.08 米(3英寸 $\times$ 3英寸)的NaI(Tl)伽玛射线探测器。

* 相反,有人却认为,煤(无灰分煤)的实际密度会随 $V \cdot M$ 含量的减小而增大(范克雷维伦(Van Krevelen),1961)。这种认识是有矛盾的,因为已经得知测井测得的视密度与实际密度和 Z/A 值成正比,因此低 $V \cdot M$ 煤的视密度较低,因而含氢量也低。

图11 表示将仪器固定放置在三个不同地层的相应位置上, 在采集时间周期为600秒的情况下记录的二次中子伽玛射线的能谱。请注意, 根据硫在5.42MeV时的贡献可以把含硫和含黄铁矿煤的能谱清楚地区分开来(图11, a和b)。

图12 表示根据硫峰上捕集的计数与岩芯分析硫之间的关系得到的刻度直线(相关系数为 $R=0.96$)。这一结果表明, 探测硫的绝对精度大约可达1%。对于铁和硅也得到了类似的结果。利用测井曲线综合确定硫、铁和硅, 能够清楚地提供出煤的质量指标。图12还说明, 在仅有20秒的情况下, 先对能谱进行最小二乘多项式平滑滤波而后对峰值区域进行积分所记录的能谱, 可以获得令人满意的结果。

考虑到方法对铁、锰和氯化铁的灵敏度, 钻孔不应当下有钢套管或聚氯乙烯(PVC)套管; ABS塑料则是一种合适的套管材料。至少在浓度为2500PPm之内时, 井液中的氯化铁是不会使中子伽玛射线的能谱发生畸变的。地层中的氯浓度不会高于0.12%。由于NaI晶体的能量分辨率有限, 高的氯浓度当然会影响这种类型的测井。该井下仪的直径大约是0.1米(4英寸), 而用小井眼的井下仪要达到同样的精度看来是不可能的。该系统的另一个缺点是其工作成本比标准测井的成本要高。

鉴于确定水分含量对低变质级别原生煤的重要性, 我们也开始研究水分对电阻率的响应。业已设计出在褐煤样品上测量电阻率的实验室方法, 并克服了与电极影响有关的各种困难。图13中绘出了用这种方法测得的褐煤电阻率与水分含量(重量百分比)之间的关系。所用样品系取自加拿大、印度尼西亚(苏门答腊)、德国和澳大利亚的不同煤田。在如此多变的样品上也能观测到非常密切的电阻率—水分相关性, 所以看来即使对难以确定的煤的水分含量没有专门的了解, 也能够利用新一代的聚焦电测井曲线可靠地求得原生水分的含量。

在煤矿开采设计中必须要有土木技术方面的资料, 这些资料一般是由野外岩石力学试验或实验室测定得到的。较少的实际研究似乎已经建立了测井响应与煤层及其围岩的工程特性之间的相关关系。将根据纵波和横波速度得到的动态模量与静态试验相联系的努力, 未必是成功的, 而且利用钻孔声波系列的记录来检测横波常常是非常困难的。

因此, 指出下面这一事实是有意义的, 业已发现, 中子测井响应与煤层围岩的强度之间存在着明显的相关关系, 如图14所示。在这个实例中, 采用了轻便的点载荷试验装置来测量间接量度抗压强度的强度指数($Is=50$)。已得到极好的相关关系如图15所示。图中, LSNN响应曲线与经过处理后得到的点载荷试验强度曲线很相似, 后者是将每0.05米测量的强度数据滤波后得到的。该滤波作用的原理是, 对相当于LSNN源距的整个深度层段进行滑动平均, 其结果受类似于记录LSNN曲线所用的滤波时间常数的控制。

除了上述野外试验之外, 还用相同的岩芯进行了实验室测定, 借助于一种简单的非破坏性压痕试验测定出通常所说的布氏硬度值(BHN)(范德弗里斯(van der Vlis), 1970)。图16(上图)表明, LSNN响应与布氏硬度之间存在着非常好的相关关系, 而声波(纵波)测井数据与岩石的硬度之间仅有中等的相关关系(图16, 下图)。在图16所研究的整个层段上, 布氏硬度与伽玛曲线之间也存在着非常好的相关关系(图中未画出)。看来, 在此种情况下的强度/硬度在很大程度上取决于页岩, BHN—中子相关关系比BHN—伽玛相关关系更好这一事实, 大概是由于孔隙度或胶结作用对岩石硬度有附加影响的缘故。虽然我们在许多煤田上都观测到了强度数据与中子响应之间存在着很好的相关关系, 但是这些相关关系在定量上还是各不相同的。即使如此, 各地区实际需要的却正是本地区的测井值与有用的岩石强度参数之间的有效的相关关系。

结 论

在壳牌公司的所有煤勘探工作中,测井已经成为标准化的业务。现在,测井资料的可靠性已使定量解释成为可能。利用煤质参数来刻度测井曲线已经获得成功,而且应用测井曲线来取得有关岩石强度的资料也具有很大的可能性。所建立的全部相关关系都带有地区的特点,并需要进行普遍性的检验。上述定量解释将十分有助于更好地评价煤矿床。

参考文献

1. Lavers, B.A. & Smits, L.J.M., Recent developments in coal petrophysics, The Log Analyst XVIII No.1 January-February 1977.
 2. Kloosterman, R.A., Brom, R.W.C. & Lonfat, F., Application of wireline logging techniques in the assessment of openpit mineable coal, proceedings of the Symposium on the Indonesiaen mining industry, its present and future, Jakarta, June 14-16, 1977.
 3. Krevelen, D.W. van, Coal, typology, chemistry, physics and constitution, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, New York, 1961.
 4. Vlis, A.C. van der, Rock classification by a simple hardness test, Second congress of the Int. Soc. for Rock Mechanics, Beograd, 21-26 September, 1970.
- 译自 S.P.W.L.A., 22nd Annual Logging Symposium, 1981.

黄智辉 译

杨显勤 校

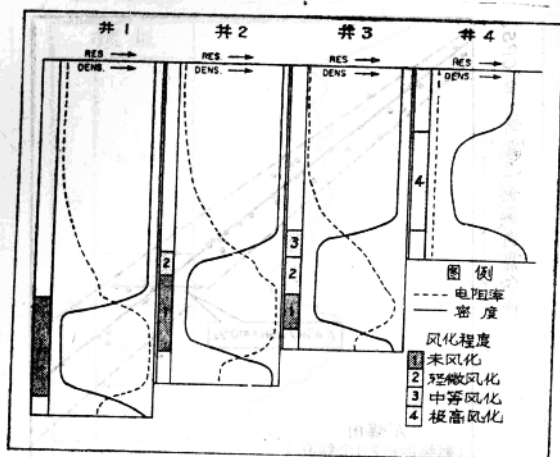


图1 风化作用对煤层电阻率响应的影响

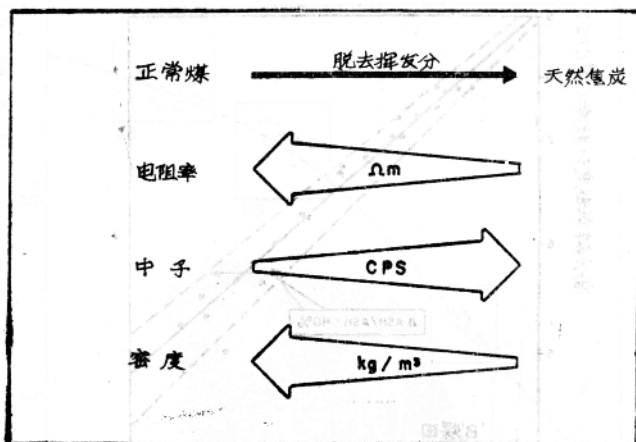


图2 当受热使煤的级别增高时，
煤的脱去挥发分作用的典型测井响应

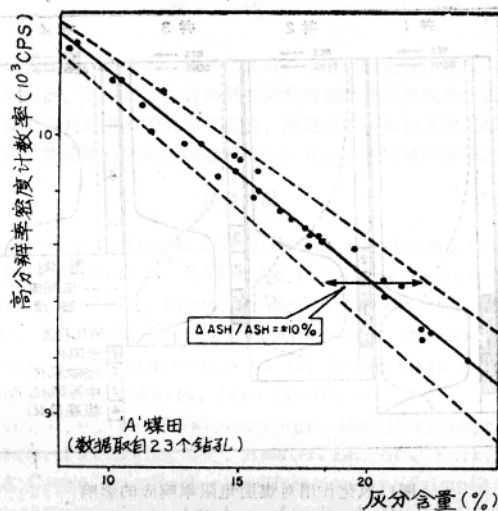


图3 按照灰分含量刻度密度测井

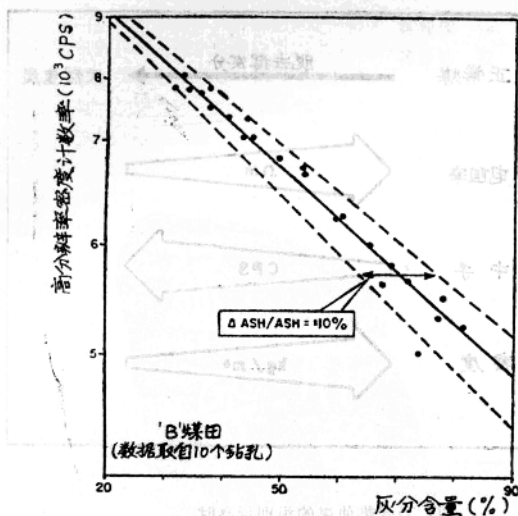


图4 按照灰分含量刻度密度测井

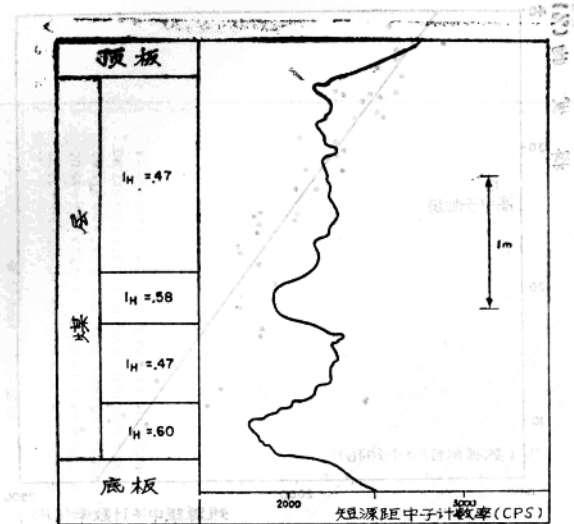


图5 中子响应对煤层含氢指数 (I_H) 变化的反映

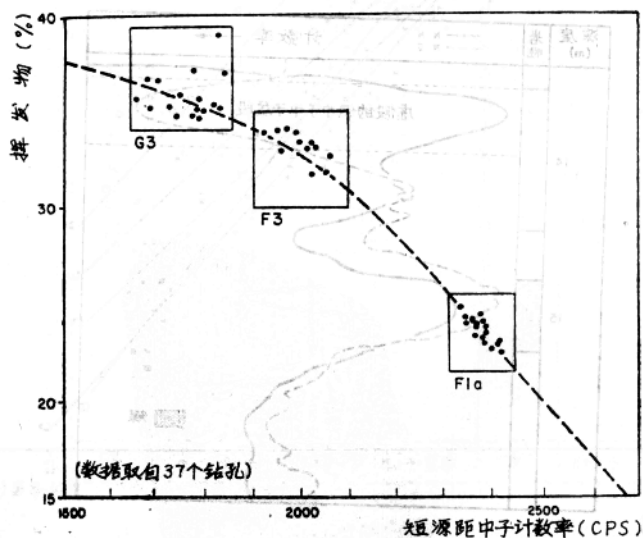


图6 显微组分不同的三个煤层的挥发物与中子响应之间的关系

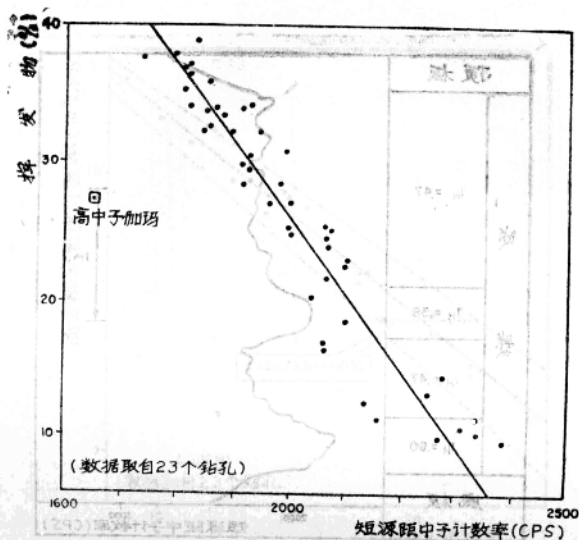


图7 挥发物与中子响应之间的关系

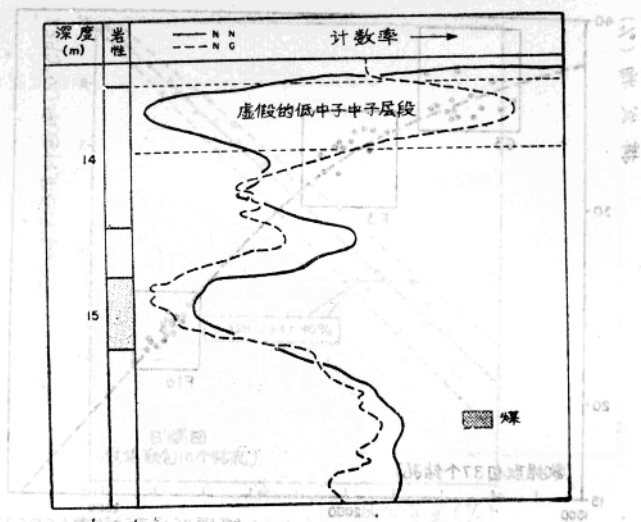


图8 由于煤中存在中子吸收体使中子中子曲线和中子伽玛曲线呈镜像反映

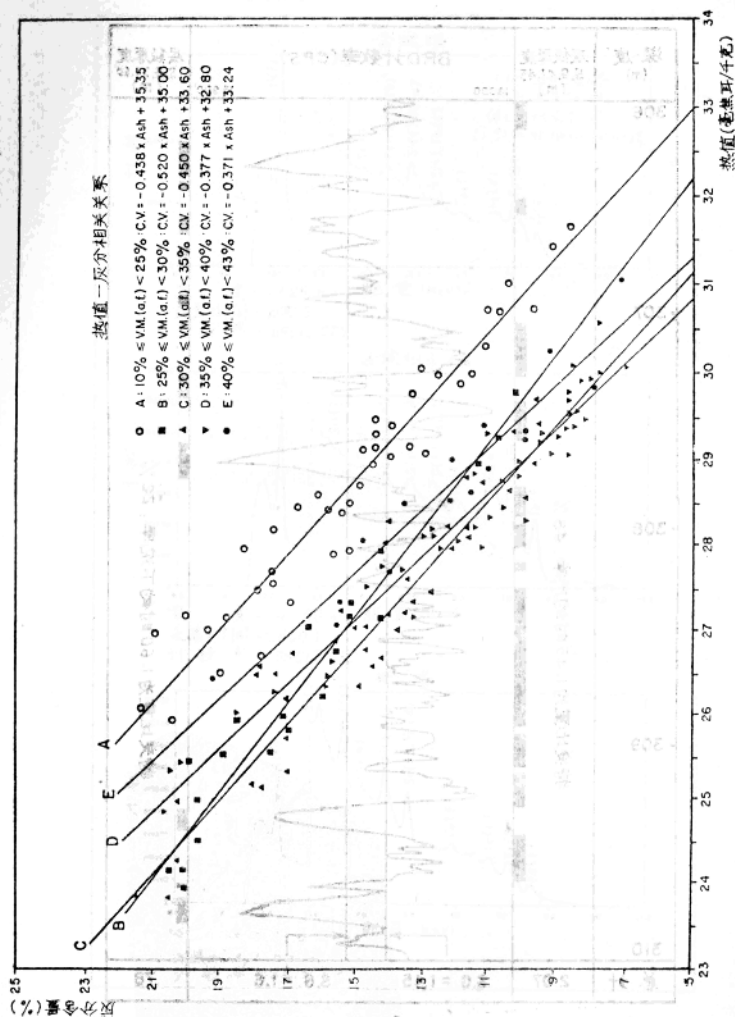


图9 不同挥发物 (V.M.) 组分条件下, 热值 (C.V.) 与灰分含量之间的关系