

# 天然气水合物测井与评价技术进展

陆敬安<sup>1</sup>, 闫桂京<sup>2</sup>

(1 广州海洋地质调查局, 广州 510760 2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

**摘要:**随着天然气水合物勘探工作的不断深入, 钻井已成为勘探的必需手段。近年来, 针对天然气水合物的钻探工作已在全球范围内开展, 如 ODP164 航次、日本南海海槽的天然气水合物钻探、ODP204 航次、加拿大马更些河三角洲地区、IODP311 航次及印度的天然气水合物钻探, 这些钻探工作都伴随着地球物理测井, 不同地区的钻探由于钻探目的层的地质条件及地质任务不同, 分别采用了不同的测井方法, 在储层测井评价方面也使用了各种各样的手段, 对天然气水合物的识别和精细评价起到了十分积极的作用。主要从测井方法与资料评价两个方面介绍天然气水合物测井领域的新进展。

**关键词:**天然气水合物; 测井方法; 解释模型

**中图分类号:** P744.4 **文献标识码:** A

测井在常规油气层评价中已经得到了非常广泛而深入的应用<sup>[1]</sup>, 而天然气水合物勘探则主要是沿用了油气评价过程中所使用的测井方法及解释手段, 并没有专门针对天然气水合物勘探来研制一些特殊的方法。在天然气水合物储层评价方面, 所使用的模型也是借用了油气评价的原理, 在此基础上, 根据天然气水合物特殊的物理化学特性<sup>[2]</sup>, 发展了可快速评价天然气水合物的算法<sup>[3]</sup>, 对于含泥质地层, 主要参考双水模型。日本国家石油公司在日本南海海槽的天然气水合物测井评价中, 开发了专用的天然气水合物评价软件 (ALPHA)<sup>[4,5]</sup>, 所采用的手段较多, 但研究思路仍借鉴了油气测井评价方法, 由于日本也是加拿大西北马更些河三角洲地区 Mallik 系列钻探井的赞助者和参与者, 因此, Mallik 井的测井数据评价也部分使用了该软件, 其他

地区的测井数据处理与评价则主要使用斯仑贝谢公司的 Geoframe 软件。

## 1 天然气水合物测井方法

天然气水合物钻井勘探的过程中, 测井工作必不可少。一方面通过测井可以获得原位状态的地层物理响应特征<sup>[2]</sup>; 另一方面, 相对于取心而言, 测井具有连续性及经济性的优点, 可以给全井眼评价提供多种可靠的测井响应数据。从早期的美国阿拉斯加西北 Elieen State 2 井<sup>[3]</sup>、危地马拉中美海沟的 DSDP84 航次的 570 号钻孔, 到近年来的 ODP164 航次<sup>[4]</sup>、日本南海海槽天然气水合物勘探井<sup>[5,6]</sup>、ODP204 航次<sup>[7]</sup>、IODP311 航次等均不同程度地使用了测井方法来获取地层的物理响应。为了能更进一步地了解未受钻井泥浆污染的近井眼地层特性, 从日本南海海槽的水合物钻探开始还使用了随钻测井方法, 对准确描述原位状态的天然气水合物及

收稿日期: 2007-02-11

作者简介: 陆敬安 (1970—), 男, 博士, 从事海洋地球物理资料采集及综合解释工作。

含水合物层深度的确定起到了积极作用,其中 ODP204 航次所使用的方法最为全面。

## 1.1 随钻测井

### 1.1.1 随钻测井仪

日本南海海槽井、ODP204 航次、IODP311 航次及印度的天然气水合物钻探均使用了随钻测井。ODP204 航次同时部署了随钻测井(LWD)和随钻测量仪器(MWD)<sup>[7]</sup>。它们分别测量了不同参数,LWD 和 MWD 仪器均置于钻头上方的钻环中,分别用于测量原位地层性质和一些与钻探有关的参数(如钻头的重量及扭矩等)。LWD 和 MWD 仪器的区别为 LWD 数据被记录到井下计算机的内存中,并在仪器到达海面后取出数据,而 MWD 数据是通过钻探流体以调制纵波的方式来传送的,并可进行实时监控。当 LWD 与 MWD 仪器同时使用时,MWD 仪器也能实时传输 LWD 数据,因此,LWD 广义上指 LWD 和 MWD 两种仪器。

LWD 仪器由电池驱动,并使用可擦写、可编程的只读存储器芯片来存储数据。LWD 仪器以等时间间隔的方式进行测量,并与位于钻井平台上监控时间和钻探深度的系统同步。钻探后,收回 LWD 仪器并下载测量数据。这样,利用井上的同步和井下时钟就可以将海面上的时间深度数据与井下的时间测量数据合并成深度测量数据文件。

随钻测井的模式并不是固定不变的,其中的测井方法可根据现场地质条件及测井服务公司的能力而有选择性地开展,如日本南海海槽的天然气水合物随钻测井使用的是 RAB—CDR(补偿双侧向)—CDN(补偿密度—中子)组合,其他的测井方法还包括深感应、岩性密度、自然伽玛及差分井径等<sup>[5]</sup>,同样可以达到预期的目的。

### 1.1.2 随钻测井数据流

ODP204 航次的随钻测井及随钻测量数据的船上处理流程为(如图 1 所示)<sup>[7]</sup>:

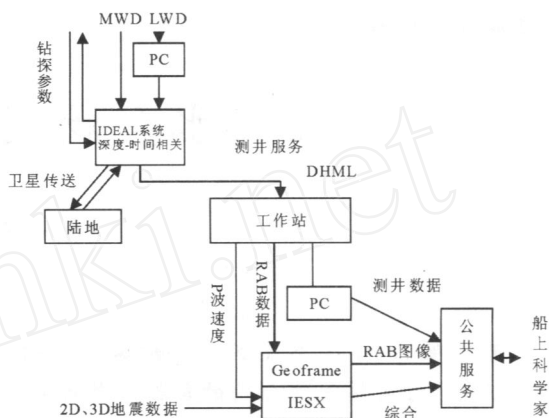


图 1 ODP204 航次随钻测井与随钻测量数据流

IDEAL——综合钻探、评价与测井系统;

DHML——井眼测量实验室;

IESX——斯伦贝谢 Geoquest 地震软件。

Fig. 1 The LWD and MWD data flow in ODP204

(1) 将钻探参数直接输入斯伦贝谢的 IDEAL 系统;

(2) 利用一台 PC 机下载 LWD 数据并将其传送到 IDEAL 系统作时间—深度相关;

(3) 随后测井数据通过 DHML 的工作站被分发给钻探资料研究小组;

(4) 将 RAB 数据分发给钻探资料研究小组之前,利用斯伦贝谢的 Geoframe 软件将其解编并转换为图形格式。

## 1.2 电缆测井

电缆测井在天然气水合物勘探过程中的应用早于随钻测井,早在 1972 年阿拉斯加西北部的 Eileen State 2 井就已开展了天然气水合物电缆测井工作<sup>[8-11]</sup>。电缆测井可以为储层参数评价提供丰富的信息,同时还为天然气水合物矿藏的计算提供相对准确的约束条件。

早期的电缆测井也较为简单,常规测井居多,如自然伽玛、自然电位、声波、中子、密度及电阻率测井<sup>[2,3]</sup>等,后来的测井工作也融入了当时最新的测井技术,如电阻率成像测井、偶极声波测井、电磁波传播测井、核磁共振测井<sup>[5,7]</sup>等,这些测井方法不仅可以研究天然气水合物

储层的储集特性,还进一步丰富了对天然气水合物地层结构的认识。事实上,在开展天然气水合物钻探的同时都不同程度地进行过电缆测井工作。

### 1.2.1 电缆测井方法

通常在天然气水合物电缆测井中使用的测井方法见表 1,这些测井方法在 ODP204 航次中使用最为全面。另外电磁波传播测井仪(EPT)仅在加拿大马更些河三角洲地区的 Mallik 5L-38 井中使用过,由于电磁波传播测井仪的垂向分辨率较高,因此,它具有良好的薄层分辨能力。日本南海海槽的天然气水合物测井使用的方法有自然伽玛能谱、偶极横波成像(DSI)、高分辨方位侧向、自然伽玛射线、组合磁共振成像、全井眼地层微成像仪及地层动态测试,阿拉斯加 Prudhoe Bay 油田西北部 Eileen State 2 井、DSDP84 航次的 570 号钻孔则使用过自然电位(SP)测井<sup>[2]</sup>,这些测井方法并不是同时在同一口井使用,而是根据实际情况在不同的井中使用了不同的测井方法。

### 1.2.2 电缆测井数据流

在 ODP204 航次中,每次电缆测井的数据都进行了数字记录和存储,并利用斯仑贝谢公司的 MAXIS 500 系统来实时监控。每口井测井完成之后,数据被传送至 DHML 井中测量实验室进行初步的处理和解释。利用斯仑贝谢公司的 Geoframe 3.8 软件包来解释地层微电阻率扫描成像数据,而根据声波和密度测井并利用 GeoQuest's IESX 软件包来合成地震记录<sup>[7]</sup>。

同时,测井数据在采集之后还立刻通过 FFASTEST 卫星的高速数据链被传送到哥伦比亚大学的拉蒙特多尔蒂地球观测实验室(LDEO-BRG)进行处理。在 LDEO-BRG 的数据处理包括:所有测井曲线相对同一深度起点的深度转换;单个仪器的校正;质量控制及突变值的剔除。LDEO-BRG 的工作一经处理完毕,测井资料即被传送回船上,从而提供近实时的资料处理。有关 FMS 数据的后

表 1 天然气水合物电缆测井方法(仪器)

Table 1 The wireline logging methods for gas hydrate exploration

仪器	输出	仪器名称/输出说明
APS	APLC	加速器孔隙度探头
	SIGF	靠近阵列孔隙度(石灰岩刻度)
	STOF	地层俘获截面
		仪器偏离(计算出的偏离井壁距离)
DIT	IDPH	双感应仪
	IMPH	深感应电阻率
	SFLU	中感应电阻率
		球形聚焦电阻率
DSI		偶极声波成像仪
	DTCO	纵波延迟时间
	DTSM	横波延迟时间
	DTST	斯通利波延迟时间
FMS		地层微扫描仪
	C1,C2	直交井孔直径
	PIAZ	极板 1 方位
		井壁空间定位电阻率图像
GPIT		通用测斜仪
	DEVI	井孔偏差
	HAZI	井孔方位
	Fx,Fy,Fz	地球磁场
	Ax,Ay,Az	加速度
HLDT		恶劣环境岩性-密度仪
	RHOB	体积密度(校正后)
	PEF	光电效应
	CALI	井径
	DRHO	体积密度校正
HNGS		恶劣环境伽玛射线探头
	HSGR	标准(总)伽玛射线
	HCGR	计算伽玛射线
	HFK	钾
	HTHO	钍
	HURA	铀
QSST		在线检测仪
SGT		闪烁伽玛射线仪
	ECGR	环境校正的伽玛射线
TAP		温度/加速度/压力
VSI		垂直地震成像仪
		声波到达时
WST		井中地震仪
		声波到达时
EPT		电磁波传播测井仪
		介电常数
		电阻率
SP		自然电位测井仪
	电压	地层自然电位

航次处理也是在 LDEO-BRG 实验室中进行的。

ODP204 航次钻探船上的测井工作由 LDEO-BRG 联合英国莱斯特大学的井孔研究所、德国 Aachen 大学、东京大学、斯伦贝谢测井服务公司及斯伦贝谢的随钻测量服务公司共同完成的。

其他航次如日本南海海槽及 IODP311 航次的现场测井工作也都是由斯伦贝谢公司来完成的。但日本南海槽的天然气水合物测井数据解释使用的是由日本国家石油公司开发的“ALPHA”软件,加拿大马更些河三角洲地区的 Mallik 井系列的测井曲线也是由研究人员自行解释的<sup>[5]</sup>。

随钻测井具有即时性,在地层尚未遭泥浆侵入的情况下,即获得地层的测井响应曲线;而电缆测井则具有延时性,受泥浆侵入的影响,尤其是不同时间、探测深度不同的电阻率测井所测的地层电阻率各不一样,据此可以方便地探测到渗透性地层的存在。根据 ODP204 航次的随钻测井和电缆测井结果分析,除一些受时间延时影响的测井方法外,电缆测井与随钻测井的效果接近,而电缆测井的分辨率要优于随钻测井。

## 2 天然气水合物储层测井评价模型

早期的天然气水合物测井评价孔隙度模型主要基于体积模型,饱和度的求取则建立在阿尔公式的基础上<sup>[12,13]</sup>,如 ODP164 航次使用的快速查看法<sup>[4]</sup>。由于储层岩性多为砂泥岩,泥质成分对地层评价的影响不能忽略,于是后来的天然气水合物评价采用了双水(D-W)模型及印度尼西亚公式,在大洋钻探和日本南海海槽的水合物钻探中,测井资料评价使用了双水模型、声波速度法及统计法等方法。其中日本国家石油公司利用双水模型研制的软件“ALPHA”经过修改还用于 Mallik 2L-38 井的测井

资料评价。

### 2.1 双水(D-W)模型

根据天然气水合物的地质生成环境分析,其主要出现于泥质砂岩当中。如果天然气水合物填充于泥质砂岩孔隙中,则可以选用双水模型。双水模型是由 Clavier 提出的<sup>[14,15]</sup>,该模型将地层结构划分为固体颗粒和孔隙两部分,其中固体颗粒又分为砂、粉砂和黏土颗粒 3 种组分,而孔隙空间又包括束缚水、自由水和油气 3 部分,双水模型的名称也是由此而来的。对于天然气水合物而言,上面提到的油气应换为水合物,由此而得到的天然气水合物的相立模型。

日本国家石油公司基于双水模型建立的天然气水合物模型将地层骨架划分为砂和胶结物两部分,粉砂和干黏土均为泥质,总孔隙包括束缚水、自由水及甲烷水合物所占据的空间,该模型还考虑了靠近井壁位置处水合物的分解所产生的水及游离气,但在实际评价过程中,如使用深探测电阻率数值,此部分可不予考虑。

### 2.2 核磁测井孔隙度模型

核磁测井记录的信号最大幅度与岩石孔隙流体中质子总量成比例,可以刻度为地层的孔隙度<sup>[14]</sup>,核磁测井不仅可以获得岩石的总孔隙度,而且可以区分不同孔隙流体所占据的孔隙度大小,如黏土束缚水、毛细管束缚水所占据的孔隙度。对于常规油气而言,烃是自由流体,因此属于自由流体孔隙度的一部分,而当地层中含有天然气水合物时,由于天然气水合物为固态,不能作为自由流体。

因核磁测井测量的是孔隙中的自由流体,因此,在采用测量地层总孔隙的测井方法时,利用总孔隙度测量结果减去核磁测井孔隙度即可求出天然气水合物孔隙度,进一步求出天然气水合物的饱和度。该方法既简单准确,同时又消除了利用其他方法求孔隙度时需确定相关参数的麻烦和主观性,被认为是有效的求取天然

气水合物所占岩石体积百分比的方法之一<sup>[5]</sup>。

### 3 天然气水合物测井评价效果实例

天然气水合物测井评价有许多效果很好的例子,针对 DSDP570 航次、ODP164 航次及美国阿拉斯加西北部 Eileen State 2 井已有多篇文献介绍<sup>[2,3,16]</sup>。最近的几个航次由于使用了最新测井技术所获得的效果则更为明显,在不同方面反映这种效果的例子也非常多<sup>[23]</sup>,这里仅列举部分成果加以说明。

204 航次的 1244D 孔及 1244E 孔的 LWD 测井及 CWL 测井质量都非常好<sup>[7]</sup>。根据高电阻率、高声波速度及 RAB 图像异常识别出 40 ~ 127 mbsf 深度处存在天然气水合物。RAB 图像还揭示了被天然气水合物充填的裂缝的存在证据。其中的 NMR 数据被传送到岸上处理,用于估算束缚水体积和自由流体体积并与中子、密度和岩心估计的孔隙度进行了对比。

在 1244D 孔中,使用随钻测井的密度、中子和核磁共振测井计算了沉积物的孔隙度,而利用岩心分析数据来刻度和评价测井孔隙度。用上述 3 种方法计算的孔隙度与岩心孔隙度对比表明。0 ~ 247 mbsf 处的密度测井孔隙度在 40 % ~ 70 % 之间。而 247 ~ 380 mbsf 处变化较大,在 35 % ~ 95 % 之间,受到井眼条件变差的影响。1244D 孔的 LWD 中子孔隙度顶部的平均值约 70 %,底部约 60 %,核磁共振孔隙度从海底至井底在 80 % ~ 0 之间变化。从这 3 种方法的效果看,密度测井与岩心分析孔隙度最接近;而中子孔隙度在上部与岩心孔隙度较为接近,但在中部的大部分深度要比岩心孔隙度高;核磁测井孔隙度在中部整体上低于岩心分析孔隙度,其测井质量可能受到了井眼条件的影响。

1244 站位使用阿尔奇方程评价了天然气水合物饱和度,其中地层水电阻率是通过测量岩心水样品得到的,而式中的  $a$  和  $m$  是利用测井电阻率和密度孔隙度交绘法确定的。各值分

别为  $a = 1$ 、 $m = 2.8$  及  $n = 1.9386$ 。1244D 孔的 LWD 测井结果表明,阿尔奇方程得到的含水饱和度平均值在 75 % ~ 100 % 之间变化,即天然气水合物饱和度在 0 ~ 25 % 之间。

用密度核磁共振法求出 Mallik 5L-38 井的天然气水合物饱和度曲线。根据 FMI 图像、密度孔隙度曲线与 CMR 核磁共振孔隙度曲线的分离,判断出 1086 ~ 1107 m 之间存在天然气水合物<sup>[13]</sup>,同时给出的还有黏土及骨架的砂质含量及含水饱和度。天然气水合物饱和度的最大值约 80 %,平均值在 35 % 左右。其结果与用常规电缆测井方法求出的天然气水合物饱和度十分接近。1107 m 之下的剖面则全部被水饱和。

### 4 讨论与建议

天然气水合物储层是一种特殊类型的储层,目前对其评价沿用的是油气评价理论与方法,即将天然气水合物作为流体来对待,而实际上,天然气水合物是以固态形式存在的,因此,建议以天然气水合物在地层中的实际赋存状态来加以研究并建立相应的评价模型;另外,泥质在地层中的分布也十分复杂,对泥质进行充分的研究和校正也是准确求取天然气水合物饱和度的关键因素之一。对砂泥岩储层而言,常存在低阻油气层,这种现象是否也可能出现于含天然气水合物储层也是值得探讨的问题。模型考虑的因素越全面,其所求取的天然气水合物饱和度越精确,但复杂的模型需要以广泛的岩心研究为基础,所以全面的岩心物性分析工作必不可少,尤其是含天然气水合物岩心的饱和度分析对于各种求取天然气水合物饱和度方法的评价十分重要。

参考文献:

- [1] Collett T S. 阿拉斯加北部斜坡普拉德霍湾和库帕勒克河地区的天然气水合物[J], 天然气地球科学, 1998, 9 (3): 3-4.

- [2] 王祝文,李舟波,刘菁华.天然气水合物评价的测井响应特征[J].物探与化探,2003,27(1):13-17.
- [3] 王祝文,李舟波,刘菁华.天然气水合物的测井识别与评价[J].海洋地质与第四纪地质,2003,23(2):97-102.
- [4] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, Dillon W P. Proceedings of the Ocean Drilling Program[J]. Scientific Results, 2000, 164.
- [5] Kunio A KIHISA, Kazuhiko TEZU KA, Osamu SENOH, etc. Well Log Evaluation of Gas Hydrate Saturation in the MITI Nankai Trough Well, Offshore South East Japan, Paper BB[C]. SPWLA 43<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium, 2002.
- [6] Yoshihiro Tsuji, Hisashi Ishida, Masaru Nakamizu, etc., Overview of the MITI Nankai Trough Wells: A Milestone in the Evaluation of Methane Hydrate Resources[J]. Resource Geology, 2004, 54(1):3-10.
- [7] Tr hu A M, Bohrmann G, Rack F R, Torres M E, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports[R]. 2003(204).
- [8] 史斗,孙成权,朱岳年.国外天然气水合物研究进展[M].兰州:兰州大学出版社,1992.
- [9] 张光学,黄永祥,陈邦彦.海域天然气水合物地震学[M].北京:海洋出版社,2003.
- [10] 周怀阳,彭晓彤,叶英.天然气水合物[M].北京:海洋出版社,2000.
- [11] John L. 考克斯 编,曾照懿,吕德本译,天然气水合物(性质、资源与开采)[M].北京:石油工业出版社,1988.
- [12] 高兴军,于兴河,李胜利,等.地球物理测井在天然气水合物勘探中的应用[J].地球科学进展,2003,18(2):305-311.
- [13] 赵洪伟,陈建文,龚建明,等.天然气水合物饱和度的预测方法[J].海洋地质动态,2004,20(6):22-24.
- [14] 李舟波.地球物理测井数据处理与综合解释[M].长春:吉林大学出版社,2003.
- [15] 李舟波.钻井地球物理勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [16] 手冢和彦.天然气水合物的测井解析[J].海洋地质动态,2003,19(6):21-23.

## 楚科奇海陆架西部沉积盆地的构造发展特征及其含油气性前景

在已有和公开发表的文献资料基础上,探讨了主要是楚科奇海陆架西部并考虑了相邻的美国海区和阿拉斯加北部沉积盆地的形成史。通过分析,划分出相当于该区已划分构造单元发展阶段的主要构造—物质成分组合,展示了由于加拿大凹陷的形成而产生的构造纲要的重建,这成为北楚科奇拗陷产生的原因。这个拗陷的强烈沉降和大量沉积物的堆积本身促进了较早年代沉积层堆积中心形成的转化补偿隆起符兰格尔—赫勒尔德区的出现。最强烈的转化和褶皱生成幕的完成与亚尔俾斯期末有关。标志这些过程的不整合面“切割”较古老沉积层中的构造形态。在转化时期产生的隆起继续进行,由此经受了上升作用。已进行的材料分析允许我们重新确定被研究区的构造结构和演化

特征。在沉积盆地的发展过程中,随着沉积层厚度的增加,形成了油气生成和储积的有利条件。巨型隆起、延伸的地层尖灭和不整合区在拗陷边缘和隆起侧坡上的存在是形成油气储积的有利因素。预计,也许生产层位于相当于含油气田的阿拉斯加剖面中尼欧克姆—亚普第期的地层中,在符拉格尔—赫勒尔德转化区范围内,作为阿拉斯加主要含油气目标层的上古生界和下古生界可能接近海底面,所以,当在重审整个楚科奇海陆架的资源时加以考虑,在此基础上,俄罗斯海域圈定了若干个具有油气前景的地区。

朱佛宏 译自《 u 》,  
2006,(2):65