

南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价

陆敬安, 杨胜雄, 吴能友, 张光学, 张 明, 梁金强

(广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 我国南海北部神狐海域的天然气水合物钻探过程中采用电缆测井来识别水合物储层, 使用了自然伽马、电阻率、密度、声波全波列、井温—井方位、井径及中子等 7 种测井仪器, 测量的参数主要包括地层的自然放射性、深(浅)探测电阻率、密度、纵波速度、温度、井径、长(短)源距中子计数率及井眼方位, 这些参数对于确定天然气水合物的赋存位置起到非常重要的作用。详细介绍了神狐海域天然气水合物测井的工作方法和基本步骤, 参照国外相关分析, 针对其中某站位钻孔 ZK1 的地层孔隙度及天然气水合物饱和度进行初步评价。结果表明密度测井和电阻率测井两种方法求出的地层孔隙度的一致性较好, 而计算的天然气水合物饱和度则高于孔隙水淡化分析得到的值, 因此尚需结合研究区岩心分析数据来提高解释精度。研究结果对未来我国的天然气水合物测井评价具有指导意义。

关键词: 天然气水合物; 测井; 参数评价; 南海神狐海域

中图分类号: P631.8; P744.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8527(2008)03-0447-05

Well Logging Evaluation of Gas Hydrates in Shenhu Area, South China Sea

LU Jing-an, YANG Sheng-xiong, WU Neng-you, ZHANG Guang-xue,
ZHANG Ming, LIANG Jin-qiang

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760, China)

Abstract: The wireline logging was applied for recognizing the gas hydrate bearing zone in the drilling of Shenhu area, northern part of South China Sea. Altogether seven instruments which were natural gamma, resistivity, density, full wave sonic, temperature, caliper and neutron logging tools were employed. The main output parameters include GR, $R_d(R_s)$, Den, V_p , temperature, Cali, Neutron counter and borehole orientation. These parameters play a very important role in identifying the depth of gas hydrate reservoir. This paper presented the operating approaches and procedures of logging in Shenhu area in detail. The preliminary evaluation and analysis were also made with the logging data from a drillhole ZK1 in a certain site. The results show good consistent between the porosity derived from density and that from resistivity, while the gas hydrate saturation determined from resistivity is higher than that from pore water analysis, the evaluation may be improved by combining with core data analysis. This study gives a good instruction for future formation evaluation of gas hydrates in China.

Key words: gas hydrate; well logging; reservoir evaluation; Shenhu area, South China Sea

0 引 言

2007 年 4 - 6 月我国在位于南海北部陆坡的神狐海域成功钻取了天然气水合物实物样品, 钻探实施过程中电缆测井方法对准确判断天然气水合物的赋存层位起到了关键作用, 尤其是电阻率测

井、声波速度测井及井径测井等 3 条对天然气水合物敏感的测井曲线清晰地反映出天然气水合物的存在, 为顺利地取到天然气水合物样品提供了十分有用的信息。本次钻探获得了含水合物区的多种测井数据, 对于研究水合物储层的各种物性和储集特性提供了极有价值的资料。

收稿日期: 2008-01-24; 改回日期: 2008-05-04; 责任编辑: 潘令枝。

作者简介: 陆敬安, 男, 高级工程师, 1970 年出生, 地球探测与信息技术专业, 主要从事海洋地球物理资料解释与研究工作。

Email: lujingan2002@yahoo.com.cn

1 区域地质概况

神狐海域位于南海北部陆坡的中段，经历了与南海北部陆缘相似的地史演化过程，最终形成以海相沉积为主导的区域性沉积层。近年的研究成果^[1]证实神狐海域的海底滑塌体以及断层—褶皱体系非常发育，有利于天然气水合物形成。神狐海域海底地形起伏较大，其下伏地层中的断裂较为发育，很多断层切穿较新的沉积层延伸至海底附近，为天然气向浅部水合物稳定带运移创造了有利条件，而褶皱构造易于捕获天然气，促使水合物的形成。在研究区的一些地震剖面中可以看到^[2]，由于断层的切割，似海底反射（BSR，bottom simulating reflector）呈断续分布；同时，天然气在沿断层向上运移过程中，由于扩散到沉积层中而形成明显的反射模糊区。此外，在神狐海域海底滑塌作用非常强烈，有分析认为可能与水合物的形成和分解有关^[3]。在 20 世纪 70 年代后期以来，有学者已注意到在海底滑塌部位存在天然气水合物^[1,3]，认为海底滑坡与水合物的分解及形成有密切的关系，并通过地震剖面发现了海底滑坡及 BSR。

本次研究在神狐海域共钻探 8 个站位，钻探区位置如图 1 所示，钻取的岩心样品显示在水合物稳定带及之上的地层岩性为松散的粉砂质泥岩。

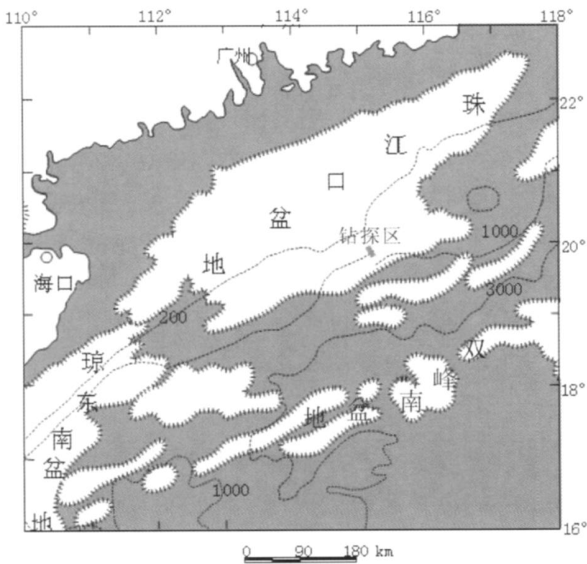


图 1 研究区地理位置 (图中虚线为水深等值线，单位 m)
Fig. 1 Location of the study area (dashed-line contour showing water depth)

2 测井实施方案

根据地震资料对似海底反射（BSR）界面进行

初步确定，并在 BSR 处适当向下延伸作为钻探和测井的目标深度，设计的钻探井的深度范围内主要为松软未固结的沉积物。在每个站位钻井 2 口，第 1 口为先导孔，用于电缆测井；第 2 口用于取心^[4]。每个站位的电缆测井分别使用 7 种仪器：自然伽马仪、电阻率测井仪、密度测井仪、声波全波列测井仪、井温—井方位仪、井径仪、中子测井仪。探测的主要参数包括：自然伽马，深、浅电阻率，长、短源距密度，纵、横波速度，井温，井斜及井方位，井径，长、短源距中子计数率等，如表 1 所示。

表 1 神狐海域天然气水合物测井方法及输出参数一览表
Table 1 Logging tools and output parameters for gas hydrates drilling in Shenhua area, South China Sea

测井仪器	输出参数	参数单位
自然伽马仪	自然放射性	API
电阻率测井仪	深探测电阻率	$\Omega \cdot m$
	浅探测电阻率	$\Omega \cdot m$
密度测井仪	长源距密度	g/cm^3
	短源距密度	g/cm^3
声波全波测井仪	纵波速度	m/s
	横波速度	m/s
井温—井方位仪	地层温度	
	差分温度	
	井斜角	°
	井方位	°
井径仪	井眼直径	cm
中子测井仪	长源距计数率	cp/s
	短源距计数率	cp/s

为了保障在井眼安全的条件下尽可能多地获得测井数据，在先导孔钻探完毕且钻杆仍位于井底的情况下实施 2 种测井方法，并且分别重复一次，共 4 个回次。一个站位的完整测井共包括 7 个回次：第 1 回次，钻杆位于井底，测量自然伽马—中子；第 2 回次，钻杆沿井筒上提 2~3 m，重复中子测量；第 3 回次，钻杆位于井底，测量自然伽马—密度；第 4 回次，钻杆沿井筒上提 2~3 m，重复密度测量；第 5 回次，将钻杆上提至位于海底面以下约 50 m 处，对裸眼井部分进行自然伽马—温度—井方位—井径组合测量；第 6 回次，对裸眼井部分进行自然伽马—中子—双侧向电阻率组合测量；第 7 回次，对裸眼井部分进行自然伽马—密度—声波全波列组合测量。其中，第 1~4 回次测井的目的是为了评估地层的稳定性及含气状况，而第 2 和第 4 回次是为了消除钻杆接箍影

响,同时保证在钻杆提出时若井壁发生坍塌仍能获得部分测井数据。第 5~7 回次测井均在裸眼井中进行,所获得的数据用于识别和评价天然气水合物储集层。

3 天然气水合物测井识别与评价

3.1 天然气水合物的测井响应特征与识别

了解天然气水合物的测井响应特征是正确识别天然气水合物储层的关键,不同的测井曲线对含天然气水合物储层有不同程度的反映^[5-6],电阻率测井和声波测井曲线组合被认为是识别天然气水合物的最有效方法^[7-9]。图 2 为本次钻探中 ZK1 孔的测井曲线,其特征描述如下。

3.1.1 电阻率测井

深探测电阻率 R_d 整体上低于浅探测电阻率 R_s , 约 $0.3 \Omega \cdot m$, R_d 在 $1.6 \sim 3.3 \Omega \cdot m$ 之间。由浅至深,深、浅探测电阻率值呈缓慢上升趋势。其中,从阴影区对应深度段的顶部开始 R_d 由 $2 \Omega \cdot m$ 快速上升,最大值为 $3.3 \Omega \cdot m$,在阴影区的底部恢复正常趋势值;此区为明显电阻率增大异常段。其异常是由于含气体、天然气水合物或地层中的其他高阻矿物造成,尚不能据此判断为水合物储层。

3.1.2 声波速度测井

本井的地层纵波速度在 $1\,500 \sim 2\,300 \text{ m/s}$ 之间变化,同电阻率测井曲线一样,自浅至深呈渐升趋势,从阴影区对应深度的顶部开始由 $1\,870 \text{ m/s}$ 明显增大,最大值达 $2\,300 \text{ m/s}$,在其底部回落至正常趋势值 $1\,790 \text{ m/s}$ 。此异常区与电阻率测井曲线对应很好,初步分析认为,此异常区是由于地层中含固态的天然气水合物或其他高阻异常矿物引起;因为气体的存在将导致声波速度降低,从而排除了气体存在的因素。

3.1.3 密度测井

密度测井曲线在此阴影区间的中部有一约 8 m 的低密度区,最小值为 1.78 g/cm^3 ,其上、下围岩的地层密度在 2.0 g/cm^3 之上,此区间密度降低的现象进一步排除了地层中含有其他高阻、高密度矿物的影响。

3.1.4 自然伽马测井

本井自然伽马测井曲线幅值在 $30 \sim 52 \text{ API}$ 之间,自上而下变化幅度不大。在阴影区部分自然伽马平均值增大,变化幅度进一步减弱,表现出与其他部分的不同特征。

3.1.5 井径测井

受地层疏松的影响,本井井径测井曲线起伏较大,反映了井眼的不规则变化,但在图中的阴影区,井径曲线较周围地层的变化幅度减小,基本平衡于 25 cm ,反映了该区间地层硬度增加。

基于以上分析并结合 Mathews、Paull 等人^[10-11]根据 DSDP 84 航次 570 钻孔、ODP 164 航次及 ODP 204 航次的测井曲线所描述的天然气水合物储层测井响应特征,判断本井的阴影区部分含有天然气水合物。与 ODP 164 航次及 ODP 204 航次相比,本井的这些测井曲线特征则更为典型。根据测井曲线指示的深度在取心孔进行天然气水合物保压取样,准确地取到了天然气水合物岩心样品。

3.2 测井数据初步评价

地层的孔隙度和流体饱和度计算需要以广泛的岩心分析数据为基础,同时岩心分析还可以为相关计算公式获得准确的参数依据,如阿尔奇公式中的常数 a 、孔隙结构指数 m 及饱和度指数 n 等。鉴于目前尚未获得相关岩心分析数据,在评价时参照并采用 ODP 164 航次的经验值,取 $a = 1.05$, $m = 2.56$, $n = 1.938\,6^{[11]}$ 。

3.2.1 孔隙度评价

选取此次钻探的某站位先导孔 ZK1 的测井数据进行初步的储层评价,孔隙度的求取采用 ODP 164 航次中使用过的两种方法:密度法和电阻率法^[2,5,8]。

3.2.1.1 密度法

计算公式如下:

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (1)$$

其中: ϕ 为孔隙度; ρ_{ma} 为地层骨架密度; ρ_b 为地层密度测井值; ρ_f 为流体密度。

3.2.1.2 电阻率法

计算公式如下:

$$R_d = \frac{a}{\phi^m} R_w \quad (2)$$

式中: R_d 为深探测电阻率测井值; R_w 为地层水电阻率; a 和 m 采用上述经验值。

这两种方法求出的孔隙度在非含水合物的层位基本吻合,主要位于 $40\% \sim 50\%$ 之间(图 2)。密度法计算的孔隙度受井径变化影响,在井径增大的地方其数值也增大;比较而言,电阻率法计

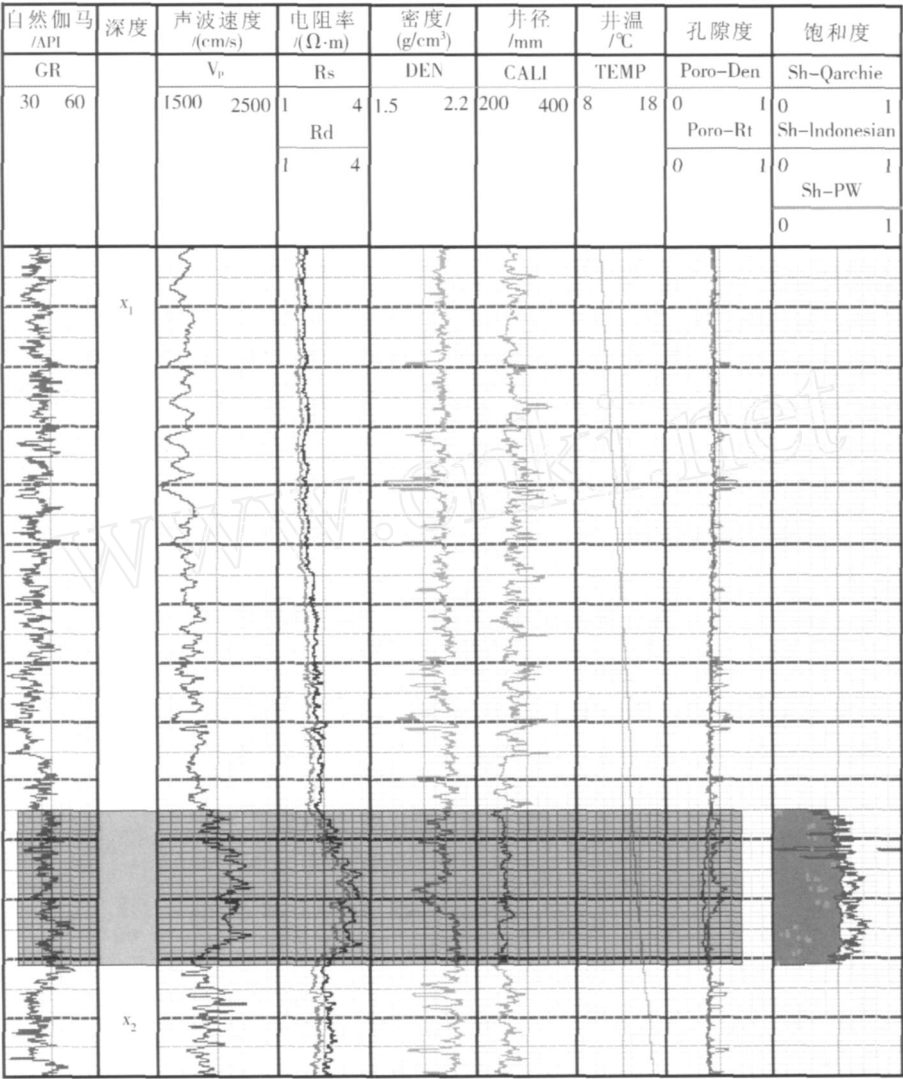


图 2 神狐海域 ZK1 孔测井曲线及初步评价结果 (阴影部分为含水合物层段)

Fig. 2 Logging curves and the preliminary evaluation for gas hydrates of well ZK1 in Shenhu area, South China Sea (the shaded interval showing gas hydrate bearing zone)

Poro-Den. 根据密度测井求出的孔隙度; Poro-Rt 根据电阻率测井求出的孔隙度; Sh-Qarchie. 根据快速查看阿尔奇公式求出的天然气水合物饱和度曲线; Sh-Indonesian. 根据印度尼西亚公式求出的天然气水合物饱和度曲线; Sh-Pw. 现场孔隙水淡化测量转换出的天然气水合物饱和度

算的孔隙度较为平稳。在含天然气水合物层段，密度法孔隙度开始增大，而电阻率法孔隙度降低，但是它们都没有真实地反映出地层的孔隙度。这是由于采用密度法计算孔隙度时，所采用的流体密度未考虑天然气水合物的影响；而含天然气水合物层由于电阻率增大，导致将这种增大的电阻率归结为骨架成分增多，从而孔隙空间相应减少。

在 ODP 164 航次中，电阻率法求出的孔隙度与岩心孔隙度相似，密度法孔隙度值也偏高，与本文的研究有相似之处。为了精确地评价含天然气水合物储层，除了选取适合本区的参数外，还应研究地层孔隙中含天然气水合物时的全填充

模型。

3.2.2 饱和度评价

计算天然气水合物饱和度时使用较多的方法主要有快速查看阿尔奇方程^[11]、双水模型、印度尼西亚公式及声波速度法^[12-13]。本文使用快速查看阿尔奇方程和印度尼西亚公式分别计算含水合物层段的天然气水合物饱和度。

3.2.2.1 快速查看阿尔奇方程

计算公式如下：

$$S_w = \left(\frac{R_0}{R_d} \right)^{\frac{1}{n}}$$
 (3)

式中：S_w，储层含水饱和度，%；R₀，饱和含水地

层 ($S_w = 1.0$) 的电阻率, $\Omega \cdot m$; R_d , 深探测电阻率, $\Omega \cdot m$; n 为饱和度指数, 经验参数。该方法假定, 如果一个沉积层的孔隙空间完全被水饱和, 则深侧向电阻率测井测量到的电阻率是完全被水饱和地层的电阻率 (R_0)。以该值在电阻率曲线上作一条基线, 利用这条基线可以确定附近含天然气水合物储层的天然气水合物饱和度 $S_h = 1 - S_w$ 。

3.2.2.2 印度尼西亚公式

印度尼西亚公式为经验模型^[12], 在日本南海海槽的天然气水合物评价中被用于计算地层水的饱和度, 一般描述如下:

$$\frac{1}{\sqrt{R_t}} = \left[\frac{V_{sh}^{1-V_{sh}/2}}{\sqrt{R_{sh}}} - \frac{\phi^{m/2}}{\sqrt{aR_w}} \right] S_w^{n/2} \quad (4)$$

其中: V_{sh} 为泥质含量; R_{sh} 为泥质电阻率。求出 S_w 后, 即可计算出地层中天然气水合物的饱和度 $S_h = 1 - S_w$ 。

如图 2 所示, 利用 ZK1 孔的相关测井数据, 采用 (3) 式和 (4) 式计算出的水合物饱和度值高于现场孔隙水淡化分析得到的水合物饱和度, 尤其是印度尼西亚公式求出的饱和度值大于 50%, 而由现场孔隙水淡化分析得到的天然气水合物饱和度一般小于 48%。这种差别可能是由以下因素造成的: (1) 孔隙度误差; (2) 泥质含量计算误差; (3) 孔隙结构指数 m 及饱和度指数 n 的选取误差等。从计算的结果看, 快速查看阿尔奇方程求出的饱和度值相对更接近实际分析值, 可靠性更好。

由于饱和度的求取较为复杂, 不仅与各项参数的正确选取有关, 还与地层的导电模型密切相关^[12-13]。含水合物地层中的泥质含量普遍较高, 泥质导电对地层导电机制的影响不可忽略, 尽可能多的岩心物性实验分析也是正确求取天然气水合物饱和度的关键, 这将是下一步工作的研究重点。

4 结 论

(1) 测井方法在识别含天然气水合物层位中起着关键作用。我国南海北部神狐海域的天然气水合物钻探通过电阻率测井、声波测井、密度测井及井径测井很好地识别出了含天然气水合物层位。该天然气水合物层位的测井曲线的表现特征为: 电阻率增大, 声波速度增大, 密度降低, 井径曲线幅值较为稳定。

(2) 参考 ODP 164 航次的经验参数 a , m 和 n , 分别计算了地层孔隙度和含天然气水合物饱和度。分析认为电阻率法计算的孔隙度值较好, 密度法计算的孔隙度易受井径变化影响。利用快速查看阿尔奇方程和印度尼西亚公式计算的天然气水合物饱和度都高于现场岩心孔隙水淡化分析值, 而快速查看阿尔奇方程的计算值更接近现场分析结果; 但是, 这两种方法均需根据本区的实际情况作进一步的改进。在以后的工作中应在更全面的岩心分析和模型建立基础上评价天然气水合物储层。

参考文献:

- [1] 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征 [J]. 现代地质, 2006, 20(4): 605 - 612.
- [2] 邓辉, 阎贫, 刘海岭. 南沙海域天然气水合物地震特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 89 - 94.
- [3] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 81 - 86.
- [4] Guangzhou Marine Geological Survey. Deepwater Gas Hydrate Investigation, Shenhu Survey Area, South China Sea, Off Shore China (Factual Field Report) [R]. Guangzhou: Guangzhou Marine Geological Survey, 2007.
- [5] 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.
- [6] 手塚和彦. 天然气水合物的测井解析 [J]. 张守仁, 译. 海洋地质动态, 2003, 19(6): 21 - 23.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Tréhu A M, Bohmann G, Rack F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program Leg 204, Initial Reports [M]. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 2003.
- [10] Mathews M. Logging characteristics of methane hydrate [J]. The Log Analyst, 1986, 27: 26 - 63.
- [11] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J. Proceedings of the Ocean Drilling Program Leg 164, Scientific Results [M]. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 2000.
- [12] Yoshihiro Tsuji, Hisashi Ishida, Masaru Nakanizu, et al. Overview of the MFTI Nankai Trough wells: A milestone in the evaluation of methane hydrate resources [J]. Resource Geology, 2004, 54: 3 - 10.
- [13] Expedition 311 Scientists. Integrated Ocean Drilling Program Expedition 311 Preliminary Report, Cascadia Margin Gas Hydrates [M]. Washington: Integrated Ocean Drilling Program Management International Inc, 2005.