

祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价

郭星旺, 祝有海

GUO Xing-wang, ZHU You-hai

1. 中铝能源有限公司, 北京 100082; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. *Chinalco Energy Company Limited, Beijing 100082, China;*

2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要: 祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程中采用电缆测井识别水合物储层, 使用了三侧向、声波速度、自然伽马、长源距伽马伽马、井温、井径、井斜 7 种测井仪器, 所获参数有利于确定天然气水合物的赋存位置。根据 DK-1 钻孔中获得水合物样品层段的测井曲线总结出水合物测井响应的特征, 并参考国外的相关资料, 对 DK-1 地层的孔隙度和天然气水合物饱和度进行了初步评价。结果表明, 电阻率方法求出的地层孔隙度与岩心分析值较为接近, 而用标准阿尔奇方程和修正的阿尔奇方程计算出的天然气水合物的饱和度值相差较大。因此, 尚需对水合物岩心进行深入的分析测试, 建立适当的岩石物理模型, 来指导中国天然气水合物的测井评价。

关键词: 天然气水合物; 测井响应特征; 评价方法; 祁连山冻土区

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2011)12-1868-06

Guo X W, Zhu Y H. Well logging characteristics and evaluation of hydrates in Qilian Mountain permafrost. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12):1868-1873

Abstract: Wireline logging was employed to confirm gas hydrate bearing sediments in the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost. There were seven instruments including resistivity, sonic, natural gamma, density, temperature caliper and inclination logging tools in this project. The parameters acquired from the well logs are important in determining the position of gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost. Referring to the data abroad, the authors used log data from drillhole DK-1 to investigate physical properties of gas hydrate and preliminarily estimate the formation porosity and in-situ gas hydrate saturations. The results show that the porosity derived from resistivity agrees with that from core analysis, while in-situ gas hydrate saturations estimated from Standard Archie and Modified Archie equation are different. Therefore, the gas hydrate sample should be further studied so as to develop an appropriate rock-physical model which can guide the future evaluation of gas hydrate.

Key words: natural gas hydrate; logging characteristics; evaluation methods; Qilian Mountain permafrost

天然气水合物是由水和气体分子(主要成分是甲烷)在低温高压条件下形成的一种冰状物质, 广泛分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中。这是一种规模巨大的新型潜在能源, 全球甲烷气潜在资源量达 $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 的甲烷气, 相当于已知煤、石油和天然气中有机碳量总和的 2 倍^[1-3], 引起了世界各国的关注。

2008~2009 年, 中国地质调查局组织中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质 105 勘探队等单位, 在祁连山冻土区成功钻获了天然气水合物实物样品。这是中国首次在冻土区发现天然气水合物, 同时也是世界中纬度高山冻土区首次发现天然气水合物, 具有重要的科学意义

收稿日期: 2011-09-16; 修订日期: 2011-10-24

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号: 1212010818055)

作者简介: 郭星旺(1984-), 男, 硕士, 从事天然气水合物测井及相关能源地质研究。E-mail: hblggxw@163.com

和经济意义^[4]。地球物理测井作为传统的资源评价方法,在天然气水合物勘探中亦是有效的评价手段^[5]。不同的测井曲线对天然气水合物储层有不同程度的反映^[6-8],一般认为高电阻率和高声波速度特征是识别天然气水合物的有效标志^[9]。随着测井评价技术的进步,传统测井方法和岩心测试数据的结合,定量计算含天然气水合物地层的孔隙度和天然气水合物的饱和度成为可能^[10-13]。本文利用获得的含天然气水合物层的多种测井数据,总结天然气水合物测井响应的特征,并对水合物层做出相应的测井评价。

1 测井数据采集方法

祁连山冻土区位于青藏高原北部。大地构造上,该区一般划分为北祁连构造带(河西走廊、走廊南山)、中祁连陆块(托来山)和南祁连构造带三大构造单元^[4,14]。研究区位于中祁连褶皱隆坳带西段^[5],分布在木里煤田聚乎更矿区内。近年的研究结果表明^[4],木里地区具有良好的气源条件,有利于形成天然气水合物。

本次在祁连山冻土区开展的天然气水合物科学钻探工程共钻探 4 口科研孔,有 3 个孔位钻获天然气水合物样品。本文采用获得天然气水合物样品的 DK-1 孔的测井资料。DK-1 孔深为 182.2m,通过观测岩心发现 4 层水合物层段,分别描述为:133.5~135.5m,在细砂岩孔隙中发现水合物,肉眼可见白色晶体;142.9~147.7m,水合物存在于泥质粉砂岩孔隙和裂隙中,肉眼可见;165.3~165.5m,泥质粉砂岩裂隙中见水合物晶体;169.0~170.5m,在粉砂岩中见水合物存在的异常现象。前 2 个层段水合物层位较厚,测井响应明显,为本文研究的重点。

在测井施工中,按照设计在每口井终孔后立即进行裸眼测井,每个井位完整测井包括 2 个回次。第 1 个回次,测量三侧向电阻率、自然伽马、长源距伽马和井径;第 2 个回次,测量声波时差、井温和井斜。DK-3 钻孔井温测量共进行了 4 次,时间间隔分别为终孔后 0h、12h、24h 和 48h,用来研究本区地温梯度的变化,其余钻孔只在 0h 进行测温。为了保障在井眼安全的条件下获得尽可能多的测井数据,测井分段实施,即套管加固前对所钻探的深度进行测井和终孔后对剩余深度进行测井,以保证测井在裸眼井中进行。本次测井施工过程中对 4 个钻孔进行了完整测井,每种测井方法的数据采集间隔均为 5cm,

测井深度累计为 1907m,所获得的测井数据用于天然气水合物储层的识别和评价。

在每个钻孔中电缆测井分别使用 7 种仪器:三侧向电阻率测井仪、声波速度测井仪、长源距密度测井仪、自然伽马仪、井温仪、井径仪和井斜仪。输出的主要参数包括:电阻率、纵波时差、长源距密度、自然伽马、井温、井径、顶角、方位角等(表 1)。

2 测井响应特征分析

测井方法对间接证明天然气水合物的存在及其赋存层位起了关键作用,其中电阻率测井、声波速度测井等测井曲线能清晰地反映出天然气水合物的存在,为确定天然气水合物产出的层位提供了必要的信息。如图 1 所示,在 DK-1 孔 A、B 层段获得了天然气水合物实物样品。以下将总结含水合物的 A、B 层段的测井响应特征,并与国外相关冻土区水合物测井响应特征进行对比分析。

2.1 电阻率测井

电阻率在含水合物层 A、B 段的值分别为 58.3~378.4 $\Omega\cdot m$ 、56.8~349.9 $\Omega\cdot m$,赋存于细砂岩、粉砂岩中。相同岩性不含水合物层的电阻率值介于 29.0~242.1 $\Omega\cdot m$ 之间,均低于含水合物的 A、B 段。相比之下,加拿大马更些三角洲 Mallik 5L-38 钻孔砂岩中水合物层段的电阻率值介于 10~120 $\Omega\cdot m$ 之间^[6],低于祁连山含水合物 A、B 段的电阻率值。这可能是地层中水合物饱和度的差异或水合物的赋存状态不同造成的。

2.2 声波速度测井

声波速度测井输出值为纵波时差,含水合物 A、B 段的纵波时差分别为 195.9~251.9 $\mu s/m$ 、204.4~

表 1 祁连山冻土区天然气水合物测井方法和输出参数
Table 1 Logging means and output parameters for gas hydrate drilling in Qilian Mountain permafrost

测井仪器	输出参数
三侧向电阻率测井仪	电阻率/ $\Omega\cdot m$
声波速度测井仪	纵波时差/ $\mu s\cdot m^{-1}$
长源距伽马伽马测井仪	长源距密度/ $g\cdot cm^{-3}$
自然伽马仪	自然放射性/API
井温仪	地层温度/ $^{\circ}C$
井径仪	井眼直径/mm
井斜仪	顶角和方位角/ $^{\circ}$

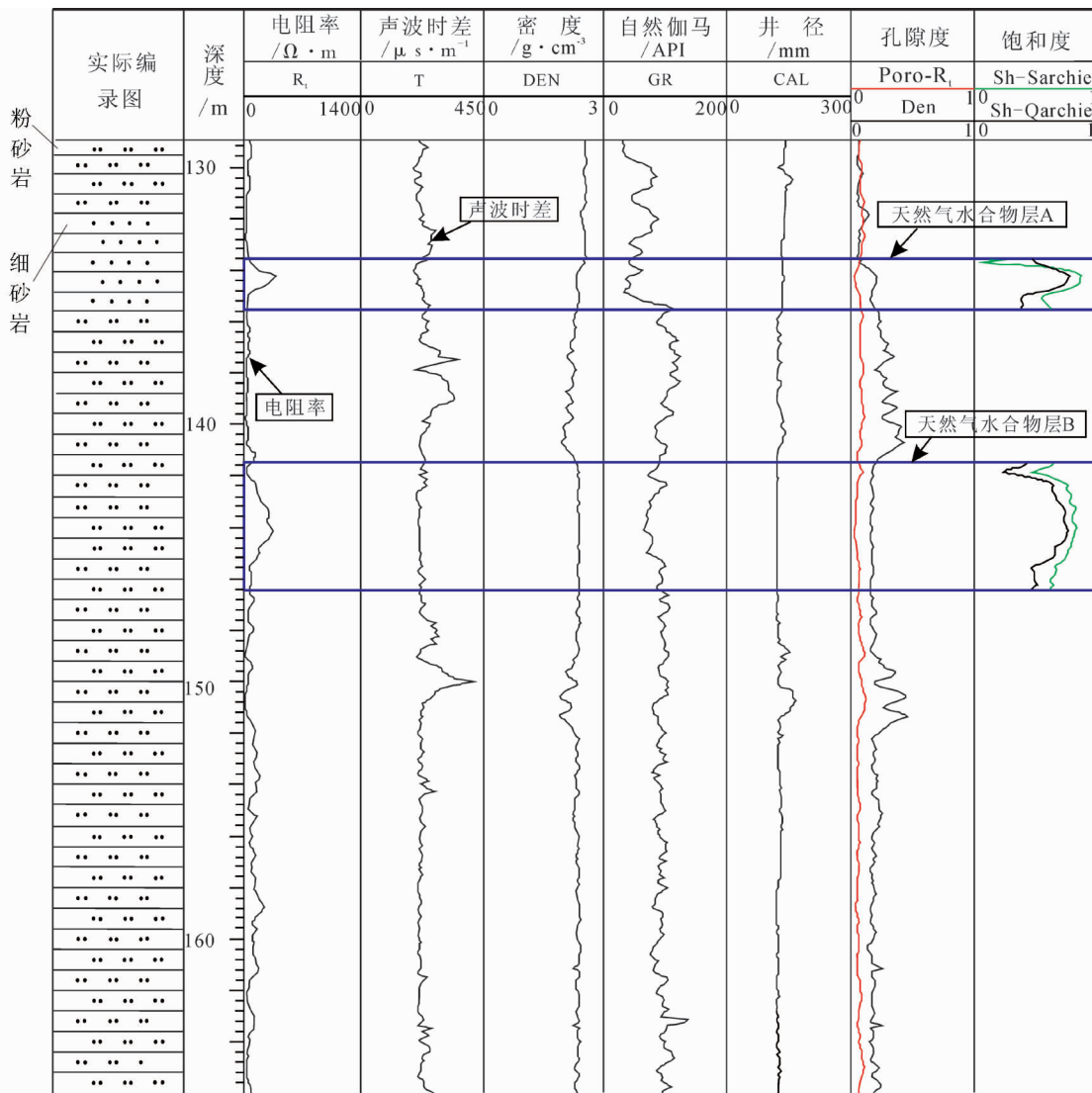


图 1 祁连山冻土区 DK-1 孔天然气水合物层段岩性、测井曲线图

Fig. 1 Lithologic and logging curves of gas hydrate layer in borehole DK-1 of Qilian Mountain permafrost
 Poro-R_i—电阻率测井孔隙度;Den—密度测井孔隙度;Sh-Sarchie—标准阿尔奇公式计算的天然气水合物饱和度;Sh-Qarchie—快速查看阿尔奇方程计算的天然气水合物饱和度

253.1μs/m, 其对应的纵波速度为 3.9~5.1km/s, 3.9~4.9km/s, 其它层位相同岩性的纵波速度为 4.7~2.5km/s, 均低于 A、B 段的纵波速度值。加拿大马更些三角洲 Mallik 5L-38 钻孔中水合物层段的纵波速度为 2.5~3.6km/s^[6], 与 A、B 段的纵波速度存在一定差异, 可能是水合物在多孔介质中的存在方式或储层的胶结程度不同引起的。此异常区与电阻率测井曲线异常区对应很好。分析认为, 其异常是由地层裂隙中含固态的水合物或孔隙中水合物的存在引起砂岩紧密胶结所致。

2.3 密度测井

密度测井曲线在 A 段从上到下逐渐降低, 由上部的 2.55g/cm³ 降低到下部的 2.37g/cm³; B 段密度测井曲线变化不大, 基本介于 2.31~2.38g/cm³ 之间。从整条曲线来看, A、B 段的密度较低, 主要因为纯天然气水合物密度低于纯砂岩密度, 当水合物充填在砂岩孔隙或裂隙中时, 这一层段则密度降低。

2.4 自然伽马测井

含水合物的 A、B 段自然伽马幅值分别为 34.6~94.5API, 64.8~107.7API, 在曲线上呈箱状降低的变

化趋势。前人研究认为^[17-20],天然气水合物赋存的空间主要为构造活动引起的断层、裂缝带和孔隙。当水合物形成时,从周围吸收大量水和烃类气体,导致水合物层内放射性元素不能沉淀,单位体积沉积物中放射性元素含量相对减少。

基于以上天然气水合物层段测井曲线的定性分析,结合 Collett 等^[16]根据加拿大马更些三角洲 Mallik 5L-38 钻孔测井曲线所描述的天然气水合物储层测井响应特征,从测井方面进一步证实在 A、B 层段含有天然气水合物。与 Mallik 5L-38 钻孔的含水合物层测井曲线相比,DK-1 孔的含水合物层测井曲线特征有其特殊性,其电阻率和声波速度测井值均高于 Mallik 5L-38 钻孔的相应值。初步认为,这与祁连山天然气水合物以薄层状赋存于砂岩裂隙中或呈浸染状充填于砂岩孔隙中的赋存状态有关。

3 测井数据评价

3.1 地层孔隙度计算方法

通过大量测井分析可以获得地层孔隙度,并用岩心实测的孔隙度对其进行校正^[7]。本文应用密度法^[21]和电阻率法^[22]来计算含水合物地层的孔隙度,并用实测岩心孔隙度进行校正和评价。

(1)密度法。地层孔隙度计算公式为:

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

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。 $\rho_{ma}=2.65\text{g}/\text{cm}^3$, $\rho_f=1.01\text{g}/\text{cm}^3$,均为 Mallik 5L-38 钻孔中的测试值^[16]。

(2)电阻率法。电阻率可以用于确定地层的孔隙度,阿尔奇公式给出了电阻率和孔隙度之间的关系:

$$R_t = \frac{a}{\varphi^m} R_w \quad (2)$$

式中: R_t 为电阻率测井值; R_w 为地层水电阻率; φ 为孔隙度; a 为比例系数; m 为胶结系数。电阻率 R_w 是地层水温度和矿化度的函数,可通过岩心水分析矿化度资料和测量的地温用 Arp 公式计算^[7]。由于尚未进行岩心水分析,地层水电阻率参照 Mallik 5L-38 钻孔中的测定值 $R_w=0.45\Omega \cdot \text{m}$ ^[16]。 a 、 m 可采用 Serra 于 1984 年提出的交会图方法计算^[7,16]。本文孔隙度解释中的 a 、 m 采用 Mallik 5L-38 钻孔使用的 $a=0.62$ 、 $m=2.15$ ^[16]。

上述 2 种方法计算出的孔隙度存在一定的差

异(表 2),密度法孔隙度平均值大于实测孔隙度平均值,电阻率法计算得出的孔隙度平均值与实测孔隙度平均值较为接近。从图 1 中可以看出,密度法计算的孔隙度变化较大,其计算结果受井径变化的影响,随井径的增大而有变大的趋势,这与粘土含量高和扩径使得仪器与井壁无法良好接触有关。而电阻率法计算的孔隙度变化幅度不大,趋势平缓。因此,电阻率法计算的孔隙度与实测值较为接近,能够较好地反映实际的地层孔隙度,但在应用电阻率法计算孔隙度时应采用实测值进行校正。此外,还应研究地层孔隙中含天然气水合物时对储层物理性质的影响,建立适合含水合物地层孔隙度的计算模型。

3.2 天然气水合物饱和度计算方法

天然气水合物饱和度是指孔隙中含水合物部分的体积与整个岩石孔隙体积的比值,通常用百分数表示。一般认为含水合物储层的孔隙中只含有水合物和水,因此在计算水合物饱和度时先计算出水合物储层的含水饱和度(S_w),然后得到天然气水合物饱和度($S_h=1-S_w$)。计算天然气水合物饱和度的过程中,用于计算含水饱和度的方法较多,主要有基于电阻率测井数据的标准阿尔奇公式^[16]、修正的阿尔奇公式^[24]、印度尼西亚公式^[25]和基于声波速度测井数据的声波速度法^[26-28]。由于测井施工中所获得的测井参数的限制,在参考国内外天然气水合物饱和度计算的基础上,本文选用标准阿尔奇公式和修正的阿尔奇公式进行天然气水合物饱和度的计算。

(1)标准阿尔奇公式。标准阿尔奇公式在 Mallik 5L-38 钻孔的天然气水合物饱和度计算中,用于计算地层水饱和度,其关系式如下:

$$S_w = \left(\frac{a R_w}{\varphi^m R_t} \right)^{1/n} \quad (3)$$

式中: S_w 为地层含水饱和度; R_t 为电阻率测井值; φ 为孔隙度; R_w 为地层水电阻率; a 为比例系数; m 为胶结系数; n 为饱和度指数。各种参数采用 Mallik 5L-38 钻孔中的经验值,分别为 $R_w=0.45\Omega \cdot \text{m}$ 、 $a=$

表 2 祁连山冻土区 DK-1 孔含天然气水合物地层平均孔隙度^[23]

Table 2 Average porosity of gas hydrate formation in borehole DK-1 of Qilian Mountain permafrost

参数名称	实测孔隙度	密度法孔隙度	电阻率法孔隙度
平均值/%	3.45	16.97	5.74

0.62, $m=2.15$, $n=1.9386$ ^[16]。

(2)修正的阿尔奇公式。计算公式如下:

$$S_w = \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n} \quad (4)$$

式中: R_0 为饱和含水地层电阻率; R_t 为电阻率测井值; n 为饱和度指数。 $R_0=24\Omega \cdot m$ ^[5], $n=1.9386$ 。该方法计算结果显示,假如一个沉积层的孔隙空间完全被水饱和,则电阻率测井测量到的电阻率是完全水饱和带的电阻率(R_0),将该值确定为一条基线,利用这条基线可以确定附近含天然气水合物储层的含水饱和度(S_w),进而计算天然气水合物饱和度(S_h)^[5-9]。

利用DK-1测井数据,采用公式(3)、(4)计算出的天然气水合物饱和度存在一定的差异(表3)。上述2种方法计算出的天然气水合物饱和度可能与实际的饱和度有所出入,尤其是采用标准阿尔奇方程计算的天然气水合物饱和度过高,不符合水合物岩心现场观察的情况。其原因可能是:①电阻率测量时存在误差;②孔隙度求取误差;③忽视泥质含量的影响;④ a 、 m 、 n 各种参数和 R_w 的选取误差等。

此外,阿尔奇公式是纯砂岩孔隙度、含水饱和度、电阻率之间的经验表达式,适用于储集层孔隙空

间被流体所充填的两相模型。利用阿尔奇公式计算天然气水合物饱和度时,假定水合物仅充填在地层孔隙中,引起孔隙空间减少^[25],而在实际的天然气水合物储层中,水合物除以浸染状充填于孔隙中之外,还以团块状存在于裂隙中。因此,如何建立祁连山天然气水合物储层的导电模型尚待进一步研究。

4 结 论

(1)测井数据是识别天然气水合物的一种重要基础数据,祁连山冻土区天然气水合物储层具有明显的高电阻和低声波时差响应特征。通过电阻率、声波时差组合能够很好地识别和确定DK-1孔天然气水合物的产出层位,分别位于地下133.5~135.5m和142.9~147.7m层段,与实际采样层位吻合。

(2)本文在计算地层孔隙度和天然气水合物饱和度时参照了加拿大Mallik 5L-38钻孔的 a 、 m 、 n 、 R_w 和美国阿拉斯加Eileen State-2钻孔的 R_0 。计算得出的地层孔隙度中,电阻率法孔隙度与实测值接近,密度法孔隙度由于受扩径和泥质含量的影响而与实测值差异较大。在天然气水合物饱和度计算中,采用2种方法的阿尔奇公式,初步结果显示DK-1

表3 祁连山冻土区DK-1孔天然气水合物饱和度计算结果

Table 3 Saturation of gas hydrate in borehole DK-1 of Qilian Mountain permafrost

深度/m	标准阿尔奇 饱和度/%	修正的阿尔奇 饱和度/%	深度/m	标准阿尔奇 饱和度/%	修正的阿尔奇 饱和度/%
133.50	13.38	46.43	144.50	79.40	72.55
133.75	20.53	50.44	144.75	77.37	66.10
134.00	74.31	65.68	145.00	75.36	65.41
134.25	85.93	75.75	145.25	73.42	62.27
134.50	84.10	72.79	145.50	66.29	48.42
134.75	76.48	64.00	145.75	65.98	48.03
135.00	56.81	40.26	146.00	62.26	49.14
135.25	56.79	38.68	146.25	62.50	50.11
135.50	60.84	36.73	146.50	56.97	41.58
143.00	76.99	67.60	146.75	70.75	56.64
143.25	81.14	71.78	147.00	68.22	54.23
143.50	80.08	73.18	147.25	63.67	41.05
143.75	79.58	72.24	147.50	55.34	35.59
144.00	82.05	74.22	147.70	55.37	43.30
144.25	80.46	74.58			

孔天然气水合物的饱和度为 13%~86%。

致谢:甘肃煤田地质局 145 队赵聿勇、孙尚哲工程师和孙宇东、刘玉辉同志完成了科研孔测井数据野外采集工作,在此深表谢意。

参考文献

- [1]Kvenvolden K A. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. *Chemical Geology*, 1988, 71: 41–51.
- [2]Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 14–31.
- [3]Sloan E D. *Clathrate Hydrates of Natural Gases* (second edition) [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998: 1–628.
- [4]祝有海,张永勤,文怀军,等.青海祁连山冻土区发现天然气水合物 [J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1762–1771.
- [5]王祝文,李舟波,刘菁华.天然气水合物的测井识别和评价 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 97–102.
- [6]陆敬安,杨胜雄,吴能友,等.南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价 [J]. *现代地质*, 2008, 3(22): 447–451.
- [7]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.
- [8]手塚和彦.天然气水合物的测井解析 [J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(6): 21–23.
- [9]Lee M W, Collett T S. In-situ gas hydrate saturations estimated from various well logs at the Mount Elbert well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.06.007.
- [10]Lee M W, Hutchinson D R, Collett T S, et al. Seismic velocities for hydrate-bearing sediments using weighted equation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B9): 20347–20358.
- [11]Collett T S. A review of well-log analysis techniques used to assess gas-hydrate-bearing reservoirs [C]//Paull C K, Dillon W P. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. American Geophysical Union: Geophysical Monograph, 2001, 124: 189–210.
- [12]Kleinberg R L, Flaum C, Collett T S. Magnetic resonance log of JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L–38 gas hydrate production research well: gas hydrate saturation, growth habit, and relative permeability [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, Bulletin 585: 1–10.
- [13]Guerin G, Goldberg D, Collett T S. Sonic attenuation in the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L–38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, Bulletin 585: 1–9.
- [14]祝有海,刘亚玲,张永勤.祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件 [J]. *地质通报*, 2006, 25(1/2): 58–63.
- [15]文怀军,鲁静,尚潞君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究 [J]. *中国煤田地质*, 2006, 18(5): 19–21.
- [16]Collett T S, Lee M W. Electrical-resistivity well-log analysis of gas hydrate saturations in the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L–38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, Bulletin 585: 1–8.
- [17]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.
- [18]Mathews M. Logging characteristics of methane hydrate [J]. *The Log Analyst*, 1986, 27(3): 13–17.
- [19]梁劲,王明君,陆敬安,等.南海神狐海域含水合物地层测井响应特征 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 506–514.
- [20]陈立英.测井技术在水合物储层识别中的应用前景 [J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(12): 14–16.
- [21]Collett T S, Lewis R E, Dallimore S R, et al. JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L–38 gas hydrate production research well downhole well-log and core montages [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, Bulletin 585: 1–23.
- [22]Jin Y K, Lee M W, Collett T S. Relationship of hydrate concentration to porosity and reflection amplitude in a research well, Mackenzie Delta, Canada [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 407–415.
- [23]卢振权,祝有海,张永勤,等.青海祁连山冻土区天然气水合物资源量的估算方法 [J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1310–1318.
- [24]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.
- [25]Hyndman R D, Yuan T, Moran K. The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172: 167–177.
- [26]Leclaire P, Cohen-Tenoudji F, Aguirre-Puente J. Extension of Biot's theory of wave propagation to frozen porous media [J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1994, 96: 3753–3768.
- [27]Carcione J M, Tinivella U. Bottom-simulating reflectors: seismic velocities and AVO effects [J]. *Geophysics*, 2000, 65: 54–67.
- [28]Yoshihimi Tsuji, Hisashi Ishida, Masaru Nakamizu, et al. Overview of the MITI Nankai Trough wells: A milestone in the evaluation of methane hydrate resources [J]. *Resource Geology*, 2004, 54: 3–10.