

天然气水合物储层地震反射相干分析研究

李灿苹¹, 李敏锋², 刘学伟³, 赵桂艳¹

(1. 广东海洋大学信息学院, 广东 湛江 524088; 2. 康菲国际石油有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:以实际水合物存在的美国布莱克海台地震数据为例, 利用地震剖面中四个层位(海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层)地震数据, 通过相干技术研究了四个层位地震波同相轴的连续性。结果表明: 在同一层位中, 随着时窗宽度的增大, 所有时窗相干值的均值都逐渐减小; 在相同时窗宽度下, 相干程度最好的为海底层, 其次为水合物层、水合物顶层及游离气层。由此, 通过对比各层位的相干值, 可以指示天然气水合物的存在, 这为水合物识别及其开采提供了有价值的参考。

关键词: 天然气水合物; 布莱克海台; 相干技术; 地震数据

中图分类号: P448

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2010)01-0076-05

Study on Coherence Analysis of Seismic Reflection of Gas Hydrate Reservoir

LI Can-ping¹, LI Min-feng², LIU Xue-wei³, ZHAO Gui-yan¹

(1. School of Information, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China ;

2. ConocoPhillips International Oil Limited Company, Xi'an 710065, China;

3. China University of Geoscience Beijing, 100083, China)

Abstract: The seismic data of the actual hydrate existence in American Blake Ridge was taken as an example. Seismic data in the four layers, namely the sea bottom layer, the top layer of hydrate, the hydrate layer and the free gas layer in seismic sections was used to conduct the coherence analysis research by the coherence technology. The results showed that in the same layer, the mean coherence value of all time windows gradually decreased with the increase of the width of the time window; in the same time window width, the best coherence degree was the sea bottom layer, followed by the hydrate layer, the top layer of hydrate and the free gas layer. Therefore, the existence of gas hydrate was indicated by comparing the coherence value of every layer, offering a valuable reference for the hydrate recognition and exploitation.

Key words: gas hydrate; blake ridge; coherence technique; seismic data

天然气水合物(gas hydrate)是一种由水和碳氢气体(主要是甲烷)组成的笼形类冰态固体物质, 形成于低温($< 10^{\circ}\text{C}$)、高压($> 10\text{ MPa}$)和一定的天然气饱和条件下, 存在于海底或陆地冻土带^[1,2]。 1 m^3 的天然气水合物可以释放出 164 m^3 的天然气, 据估算, 世界上天然气水合物所含的有机碳总量相

当于全球已知煤、石油和天然气的2倍^[1]。天然气水合物具有能量高、分布广、规模大等特点, 被认为是21世纪的重要新能源^[3], 其识别方法的研究已成为水合物勘探工作的热点之一^[4]。近年来, 中国在这方面也投入了大量的资金和人力, 并且取得了一定的进展, 我国于2007年5月1日在南海北部

收稿日期: 2009-07-25

基金项目: 国家重点基础研究发展973计划课题(2009CB219505); 广东海洋大学人才引进专项基金资助(0812182)

第一作者: 李灿苹(1977—), 女, 博士, 讲师, 现主要从事散射波地震勘探理论研究及信号处理方面研究。E-mail: canpinglihydx@163.com。

成功钻获天然气水合物实物样品，证实了我国南海北部蕴藏有丰富的天然气水合物资源^[5]。

对水合物勘探方法的研究旨在解决两大问题：水合物层及其下伏游离气区域的识别，以及水合物和游离气含量的估算^[6]。目前识别水合物最主要的、效果最为明显的依据是地震剖面上的似海底模拟反射（Bottom simulating reflector，简称 BSR）^[2,6]。从已发现水合物的实例看，也有不存在 BSR 而有水合物的实例，当 BSR 不存在时，如何识别水合物？国内刘学伟等针对此问题提出了一种更实用的水合物识别模式^[2]：低速背景中近似平行于海底的高速地质体是水合物带的特征，水合物带泊松比降低，利用纵横波速度信息易于识别水合物带下是否存在游离气。李敏锋等从基于弹性波波阻抗的 AVO 反演出发^[6]，以估计得到的纵波波阻抗、横波波阻抗、泊松比等弹性参数为依据，实现了美国布莱克海台（Blake Ridge）USGS9521 测线上的水合物层和游离气层的准确识别。

本文通过对实际水合物存在区域（美国布莱克海台，Blake ridge）的地震数据利用相干技术研究四个层位（海底层、水合物顶层，水合物层和游离气层）不同时窗宽度的地震剖面的相干值特点，定量地反映出地震剖面的横向变化，发现：1）时窗长度固定不变的情况下，各层位的平均相干值随着时窗宽度变大而逐渐变小，即波形之间相似性会随着时窗宽度变大而变差；2）相同时窗宽度下四个层位的相干值特点为：海底层相干值最大，水合物层相干值次之，水合物顶层相干值较小，游离气层相干值最小。根据相干理论，连续性好的同相轴对应于连续的地质体，由此可以通过对比不同层位的相干值，指示出水合物和游离气的层位。

相干技术早已被应用在地震资料解释中^[7]，近年来，相干技术逐渐应用于沉积环境的解释^[8]和隐蔽油气藏的勘探^[9,10]。本文将利用相干技术识别天然气水合物。

1 第三代相干技术原理

相干分析，其实质就是通过相关或相似评估地震道与道之间数据的相似性，即研究两个波形之间相似性的一种数学运算^[11]。波形相似性越好，相干值就越大；反之，波形相似性变差甚至根本不相似，相干值就会变小。Bahorich 和 Farmer^[12]于 1995 年提出了相关算法，到目前为止，该算法经历了三代

演变发展，即从第一代基于互相关的算法、第二代利用多道相似性的算法^[13]，发展到第三代基于特征结构的相干算法^[14]。由于第三代相干算法实现起来简单方便，因此，本文采用该算法计算相干值。

下面简要介绍该算法的具体实现原理^[14-16]。

假定在一个地震剖面时窗内有 M 道地震数据，每道有 N 个采样点，引用矩阵 S 表示该时窗的二维地震数据体，具体为：

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1M} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \cdots & s_{NM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： s_{nm} 代表第 m 道的第 n 个采样点的数据。矩阵 S 的第 n 行向量

$$s_n^T = [s_{n1}, s_{n2}, \cdots, s_{nM}] (1 \leq n \leq N),$$

代表数据体中第 n 个采样点的集合。如果每个时窗的数据体平均值为零，那么第 n 个采样点的协方差矩阵为

$$s_n s_n^T = \begin{bmatrix} s_{n1} \\ s_{n2} \\ \vdots \\ s_{nM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{n1}, s_{n2}, \cdots, s_{nM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{n1}^2 & s_{n1}s_{n2} & \cdots & s_{n1}s_{nM} \\ s_{n1}s_{n2} & s_{n2}^2 & \cdots & s_{n2}s_{nM} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1}s_{nM} & s_{n2}s_{nM} & \cdots & s_{nM}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

该数据体的协方差矩阵 $S^T S$ 为

$$W = S^T S = \sum_{n=1}^N s_n s_n^T = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N s_{n1}^2 & \sum_{n=1}^N s_{n1}s_{n2} & \cdots & \sum_{n=1}^N s_{n1}s_{nM} \\ \sum_{n=1}^N s_{n1}s_{n2} & \sum_{n=1}^N s_{n2}^2 & \cdots & \sum_{n=1}^N s_{n2}s_{nM} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{n=1}^N s_{n1}s_{nM} & \sum_{n=1}^N s_{n2}s_{nM} & \cdots & \sum_{n=1}^N s_{nM}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

协方差矩阵 W 的特征值大小可以定量地描述矩阵数据体的变化程度。协方差矩阵 W 特征值之和 $\text{tr}(W)$ 定义为^[14]

$$\text{tr}(\mathbf{W}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N s_{nm}^2 = \sum_{m=1}^M w_{mm} = \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (4)$$

在地震剖面中, $\text{tr}(\mathbf{W})$ 代表时窗内地震数据的能量和, 用 $\text{tr}(\mathbf{W})$ 的两个不同表达式来表示特征结构的相干值(或相干估计) E_w 。即

$$E_w = \frac{\lambda_1}{\text{tr}(\mathbf{W})} = \frac{\lambda_1}{\sum_{m=1}^M w_{mm}} = \frac{\lambda_1}{\sum_{m=1}^M \lambda_m}. \quad (5)$$

式(5)中 λ_m 为矩阵特征值, λ_1 为最大特征值。这样, 通过以上方法便可以计算出地震剖面中数据体的相干值, 研究该剖面中波形相似性或连续性, 其相干值大小能定量地反映出波形相似程度。

2 布莱克海台地震数据的实例分析

美国布莱克海台地区是世界上最早探测出水合物的地区之一, 其水合物发育区的沉积地层未固结成岩, 孔隙度比较大^[17]。该地区的两条测线

(BT21 和 USGS9521) 的地震数据是由美国 GSI 公司于 1974 年采集得到。后来的 ODP164 航次在该处所钻的 3 口井 (994、995 和 997 井) 均证实了水合物的存在^[18]。本文采用 USGS9521 测线数据进行研究。

2.1 地震数据预处理

震数据预处理的主要目标是保持和恢复道间的振幅关系; 改善数据质量, 提高信噪比; 使反射界面正确归位^[2]。对 USGS95-1 测线数据进行的预处理主要有: 振幅保真处理, 球面扩散补偿, 地表一致性振幅恢复, 地表一致性剩余静校正, 地表一致性反褶积和 0 ~ 50 Hz 低通滤波处理等^[4,6]。图 1 是该测线处理后所得到的叠加剖面。

该剖面上能比较清楚地看到指示水合物带存在的 BSR (4.2 s 处的反射同相轴), 但是从该剖面上不太容易判断水合物带的顶面和游离气层的底面。下面将利用相干技术来研究水合物层和游离气层的识别。

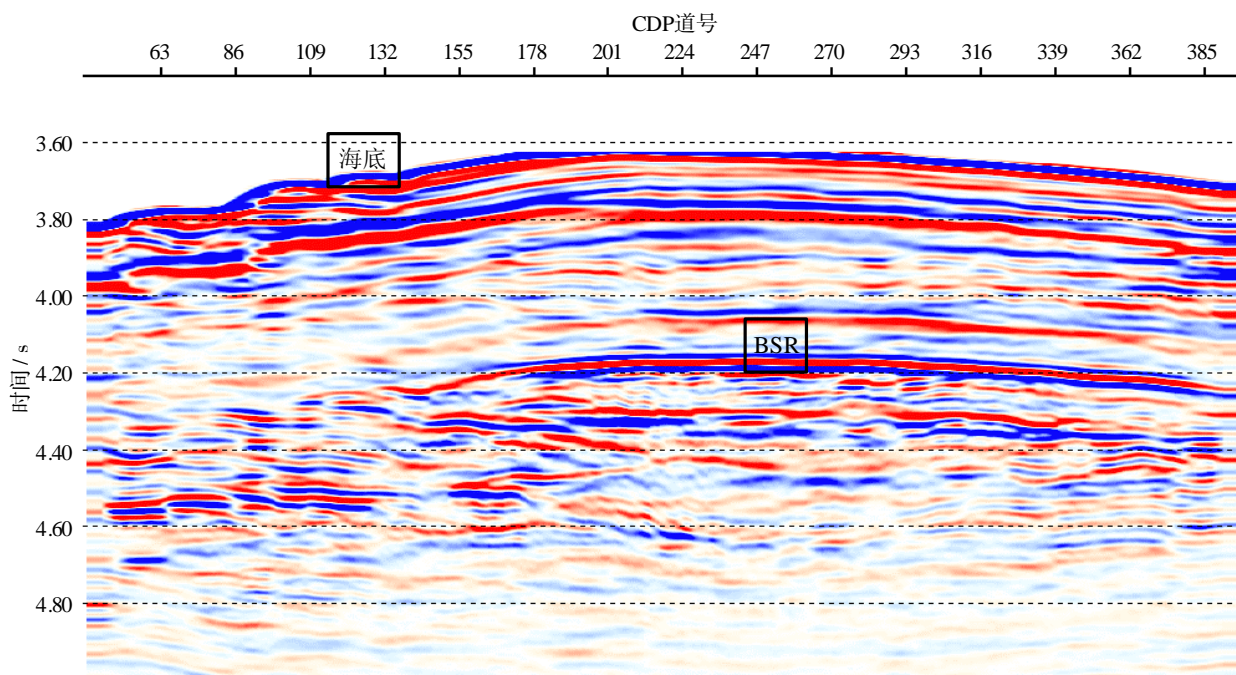


图 1 平美国布莱克海台 USGS95-1 测线叠加剖面
Fig.1 Poststack section of line USGS95-1 from Blake Ridge

2.2 相干技术实现方法

提取图 1 布莱克海台地震剖面中第 161 道至 260 道, 共 100 道地震数据, 且分四个层位进行提取, 四个层位分为海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层, 采样点范围及其他参数如表 1 所示。利用所提取的四个层位地震数据进行相干值的计

算, 具体实现过程如下:

1) 利用公式 (4)、(5) 在所提取的各层位二维地震数据体内对每道地震记录沿道移动小时窗计算每个小时窗的相干值, 时窗长度单位为采样点个数, 时窗宽度单位为地震道个数, 具体数值见后面研究内容。

2) 将整个数据体内得到的所有小时窗相干值取其均值, 作为整个层位 (数据体) 的相干值。

3) 时窗长度不变, 改变时窗宽度, 计算不同时窗宽度下每个层位的相干值, 研究时窗宽度对相干值的影响。

4) 固定时窗长度和宽度, 将不同层位的相干值进行汇总, 研究不同层位的相干值变化情况。

表 1 四个层位地震数据参数
Tab.1 Parameters of seismic data in four layers

层位	行	列	各层位采样点范围
海底	100		1 812~1 911
水合物顶层	140	100	1 913~2 052
水合物层	150		2 033~2 182
游离气层	140		2 181~2 320

2.3 时窗宽度对相干值的影响

对同一层位地震数据, 根据以上相干值实现过程, 将时窗长度固定为 50 个采样点, 时窗宽度分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 道, 研究时窗宽度的改变对相干值的影响。不同时窗宽度下四个层位的相干值如图 2 所示。

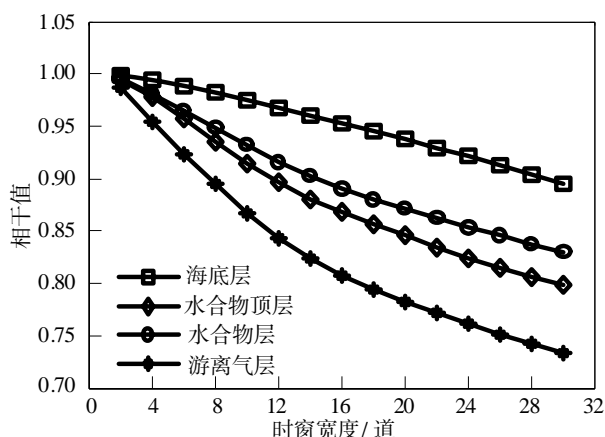


图 2 时窗宽度对相干值的影响

Fig.2 Effect of Width of time windows on coherence value

从图 2 可以看出, 在时窗长度固定不变的情况下, 四个层位的相干值变化规律相同: 随着时窗宽度变大而相干值逐渐变小, 即波形之间相似性会随着时窗宽度变大而变差。这是由于在同一地震剖面中, 时窗的加宽, 参加相干分析的道增多, 其波形相似性相对于窄时窗就会差, 所以相干值小。不同层位的相干值变化范围不同, 海底层最小, 为 0.90~1 之间, 说明海底的波形相似性较好, 这是由于海底沉积层比较均匀, 在地震剖面上形成较好的同相轴, 故相干值较大; 水合物顶层、水合物层及游离

气层相干值范围逐渐变大, 这是由于这些层位内物质分布不均匀造成的, 故相干值变化范围变大。

2.4 不同层位相干值特点

从图 2 中提取相同时窗宽度下不同层位的相干值, 这里只取 12, 18, 24, 30 道的共 4 个窗口宽度的相干值为例来研究各层位相干值的变化特征, 如图 3 所示。

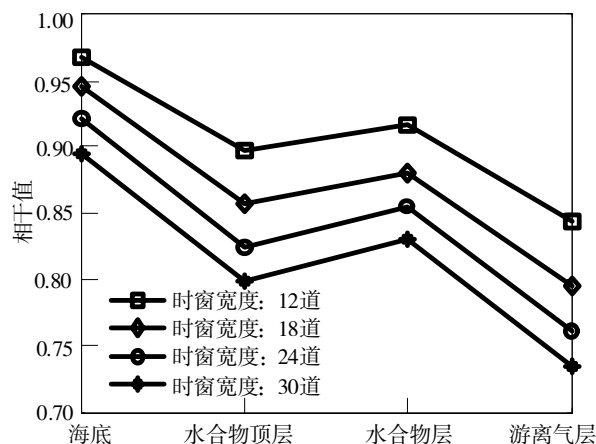


图 3 不同层位相干值特点

Fig.3 The characteristics of coherence value in different layers

图 3 显示出在相同时窗宽度下, 不同层位地震信号相干值的对比情况。从图中能够看出地震剖面的相干值的变化情况如下:

- 1) 海底层的相干值最大, 基本都在 0.90 以上;
- 2) 水合物层相干值次之, 大都在 0.8~1 之间;
- 3) 水合物顶层的相干值比水合物层低 0.03 左右;
- 4) 游离气层最低, 远远低于上述 3 个层位的相干值。

由此可见, 海底层和水合物层波形相似性较好, 水合物顶层次之, 游离气层较差。海底层相干值最大, 是由于海底沉积层比较均匀, 在地震剖面上形成较好的同相轴, 故相干值最大。水合物层相干值较大, 是由于水合物层内充满水合物, 物质分布较均匀, 故相干值较大。水合物顶层相干值较小, 是由于层内沉积物质分布不均匀导致的; 游离气层相干值最小, 是由于该层内充填游离气, 造成层内物质不均匀, 加之游离气速度较低, 使得地震剖面内同相轴连续性变差, 故相干值较低。

根据相干理论, 连续性好的同相轴对应于连续的地质体, 因此, 可以通过对比不同层位的相干值, 指示出水合物的存在。

3 结 论

通过对实际水合物存在的美国布莱克海台叠加地震剖面中不同层位(海底层、水合物顶层、水合物层和游离气层)地震数据进行相干分析研究,得出如下结论:

1) 时窗长度固定不变的情况下,各层位的平均相干值随着时窗宽度变大而逐渐变小,即波形之间相似性会随着时窗宽度变大而变差。这是由于在同一地震剖面中,时窗的加宽,则参加相干分析的道增多,其波形相似性相对于窄时窗就会差,所以相干值变小。

2) 相同时窗宽度下不同层位的相干值特点为:海底层相干值最大;水合物层相干值次之;水合物顶层相干值较小;游离气层相干值最小。根据相干理论,连续性好的同相轴对应于连续的地质体,由此可以通过对比不同层位的相干值,指示出水合物的存在。这为天然气水合物的勘探和开发提供了一项有效和实用的参考。

本文中的实际地震数据由 Tinivella 先生提供,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 张俊霞,任建业. 天然气水合物研究中的几个重要问题[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 44-48.
- [2] 刘学伟,李敏锋. 张聿文天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 33-38.
- [3] 胡中平,孙建国,赵群. 利用地震方法识别天然气水合物[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 23-26.
- [4] 李敏锋,李灿苹,刘学伟,等. 基于连续小波变换的天然气水合物层地震数据多尺度分析——布莱克海台 USGS9521 测线应用实

例[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 109-114.

- [5] 赵胜玉. 中国在南海北部成功钻获天然气水合物“可燃冰”[EB/OL]. (2007-06-05) [2009-06-10]. <http://www.sina.com.cn>
- [6] 李敏锋,刘学伟,白杰,等. 天然气水合物层和游离气层的地震反演识别——布莱克海台 USGS9521 测线应用实例[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 105-110.
- [7] 刘传虎. 地震相干分析技术在裂缝油气藏预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(2): 238-244.
- [8] 凌云项目组. 基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 642-653.
- [9] 郭栋,韩文功. 高分辨率地震资料综合解释技术及其应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(4): 290-296.
- [10] 王西文,杨孔庆,刘全新,等. 基于小波变换的地震相干体算法研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 45(6): 847-852.
- [11] 张振波. 利用相干分析技术判断断层和地层特征[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(3): 229-233.
- [12] Baborich M, Farmer S. 3-D Seismic Discontinuity for Faults and Stratigraphic Features: The Coherence Cube[J]. The leading Edge, 1995, 14(10): 1053-1058.
- [13] Marfurt KJ, Kirlin R L, Farmer SL, et al. 3-D Seismic Attributes Using a Semblance-Based Coherency Algorithm[J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150-1165.
- [14] Gersztenkom A, Marfurt KJ. Eigenstructure-based Coherence Computations as an Aid to 3-D Structural and Stratigraphic Mapping[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1468-1479.
- [15] 王大伟,刘震,陈小宏,等. 地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 71-76.
- [16] 王从镔,龚洪林,许多年,等. 高分辨率相干体分析技术及其应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1575-1578.
- [17] Shaoming Lu, George A Mcmechan. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas[J]. Geophysics, 2004, 69(1): 164-179.
- [18] ODP Leg 164 Shipboard Scientific Party. Methane gas hydrate drilled at Blake Ridge[J]. Eos Transactions, American Geophysical Union, 1996, 77(23): 219.