

文章编号: 0253-9985(2002)01-0041-04

溶洞充填物判识的频率差异分析技术

唐文榜¹, 刘来祥¹, 樊佳芳¹, 韩革华², 马学军²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石化新星石油公司西北石油局规划设计研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要: 寻找碳酸盐岩油藏的关键就是要找到充满流体的大型溶洞。塔河油田的勘探实践表明, 应用频率差异分析技术可以有效的鉴别溶洞充填物的性质。当溶洞全为流体充填时, 其地震波具有强振幅、低速度及调谐性的特征; 当充填粘稠的半流体时, 其调谐反射相当于绝对反射的 90%; 当充填物为疏松沉积物时, 其调谐反射也相当于绝对反射的 77%。以上几种介质, 都很有可能是油的储集体。对于主频集中在 20~30 Hz 的反射波而言, 只要溶洞高度在 2~3 m 以上就能识别。该技术在塔河油田进行了应用, 其连片三维区溶洞分布层及纵、横向连通情况清晰可见; 在 S48 井中的风化面下, 发现了 4 层古暗河。

关键词: 频率差异分析; 振幅-频率; 溶洞; 充填物; 油气藏; 塔河油田

第一作者简介: 唐文榜, 男, 60 岁, 教授级高级工程师, 石油物探

中图分类号: P65

文献标识码: A

找到了充填流体的大型溶洞, 就找到了碳酸盐岩油藏的主体。因此, 须在现有技术条件下探讨具有不同充填物的溶洞的地震响应特征。笔者以塔河油田为例, 采用频率差异分析新技术, 提取振幅-频率新属性, 对此进行了探索。

1 反射强度的定量描述

溶洞反射波实际上是溶洞顶底面反射波及顶底面之间的多次波复合的结果, 其强度可用溶洞顶底面复合反射系数 R 表示^[1]。

$$|R| = \frac{2r|\sin 2\pi h/\lambda|}{\sqrt{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2 2\pi h/\lambda}} \quad (1)$$

式中 R 为溶洞顶底面复合反射波振幅与垂直入射波振幅之比; h 为溶洞顶底高差; r 为溶洞顶底面的界面反射系数; λ 为溶洞充填物中传播的地震波波长, $\lambda = \frac{v_f}{f}$; v_f 为溶洞充填物中地震波波速; f 为溶洞反射波的频率。

2 反射特征

2.1 充填流体的溶洞

2.1.1 强振幅

碳酸盐岩的密度 $\rho_c = 2.5 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$, 纵波传播速度 $v_c \approx 5\,500 \sim 6\,000 \text{ m/s}$, 溶洞中流体的纵波传播

速度 $v_f \leq 1\,500 \text{ m/s}$, 流体的密度 $\rho_f \approx 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。由此可计算出溶洞壁的反射系数 $r \geq 0.8$

当溶洞中充填流体(液体)时, 15 m 高的溶洞在频率为 25 Hz 时, 复合反射波相当于碳酸盐岩与砂泥岩界面反射波振幅的 4.5 倍左右, 即使 3 m 高的溶洞(相当于 1/20 波长), 其复合反射波的振幅也与灰岩与砂泥岩界面反射波的 4 倍相当(表 1)。

表 1 $f = 25 \text{ Hz}$ 时, 不同高度(h) 溶洞的复合反射系数(R)

Table 1 Complex reflection factors(R) of different height caves($f = 25 \text{ Hz}$)

h/m	1	2	3	4	5	7.5	10	15	20
R	0.421	0.518	0.808	0.875	0.919	0.953	0.968	0.976	0.968

2.1.2 低速度

显而易见, 溶洞中充填的流体速度很低, 比其围岩碳酸盐岩低 4 000 m/s 左右, 可以想见, 地震速度反演以后, 应呈现低速特征。

研究表明, 当溶洞高度为 1/4 波长时(25 Hz, 15 m 高度), 其反演速度可以代表真实流体的速度; 但其高度小于 1/4 波长时, 溶洞对应的反演速度值会增大, 不过仍然低于碳酸盐岩的速度。

2.1.3 调谐性

从溶洞复合反射系数 R 表达式(1)还可以看出, 对于一定高度的溶洞, 当充填物性质一定时, R 值仅与频率 f 的正弦函数有关:

$$R \propto \sin 2\pi h f / v \quad (2)$$

在调谐频率 $f_1 = \psi/(4h)$ 时,对于一定高度的溶洞,由(2)式求取最大复合反射系数:

$$R_{\max} = 2r/(1+r^2) \quad (3)$$

这就是通常所说的“共振”效应,显然在调谐频率时振幅为最大。

2.2 充填半流体的溶洞

溶洞中充填物性质不同时,其反射波强弱的变化可以由溶洞壁反射系数及调谐复合反射系数来反映(表2)。以“半流体”代替稠油,“含流体的松散层”代替溶洞中充填的含流体泥沙沉积物,进行模拟试验。试验结果表明:充填粘稠的半流体的溶洞,其调谐反射相当于绝对反射的90%;即使充填物为含流体的疏松沉积物,其调谐反射也相当于绝对反射的77%,而这几种介质,都很有可能是油的储集体。

表2 高度为1/4波长由不同物质充填的溶洞的复合反射系数(R)

Table 2 Complex reflection factors(R) of different filler caves($h = 1/4 \lambda$)

溶洞内岩性	速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	r	R
流体	1 500	1.0	0.8	0.98
半流体	2 000	1.5	0.64	0.91
疏松层含流体	2 500	2.0	0.47	0.77
较致密层含流体	3 000	2.2	0.35	0.62
致密层含流体	4 000	2.4	0.18	0.35

注:碳酸盐岩 $v=5\,500\text{ m/s}$, $\rho=2.5\text{ g/cm}^3$; r 为溶洞底界反射系数; R 为溶洞高度等于1/4波长时的顶底面复合反射系数。

3 识别条件

理论计算表明:在常规频带内(20~30 Hz),即使高度很小($h \ll \lambda$)的充填流体的溶洞都能形成强反射(图1),假定复合反射系数为0.707时溶洞的

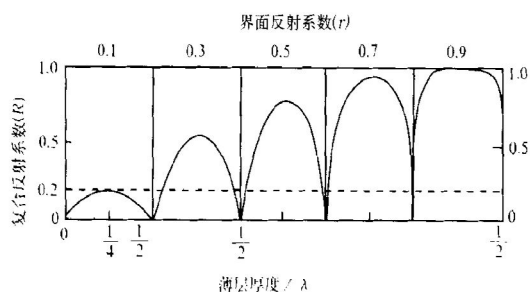


图1 不同界面反射系数(r)和薄层复合反射系数(R)与其厚度的关系

Fig. 1 Relationship between thicknesses and reflection factors of their bedded complex and different interfaces

反射波为强反射,从(1)式可以很容易推算不同充填物溶洞形成这样强度的反射时的高度。此时溶

洞高度与波长之比 h/λ 可以用下式表示:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \sin^{-1} \frac{1-r^2}{2r} \quad (4)$$

令 $r = 0.47, 0.64, 0.8$,则可计算出相应的波长 λ 和溶洞高度 h (表3)。

表3 复合反射系数为0.707时溶洞的高度

Table 3 Cavity heights each time complex reflection factor equal to 0.707

r	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	N/m	h/m
0.47	2 500	100	15.5
0.64	2 000	80	6.1
0.80	1 500	60	2.2

由此可以看出,高度为1/6.4波长(15.5 m)的充填松散泥沙的溶洞和高度为1/13.1波长(6.1 m)的充填半流体的溶洞的复合反射系数,与高度为2.2 m充填流体的溶洞的复合反射系数相同,都为0.707。而充填较致密泥沙或充填泥沙已成岩的溶洞,不管高度是否为调谐高度,其复合反射系数都小于0.707。比如,充填较致密泥沙的溶洞,即使其高度达到30 m(即调谐高度),其复合反射系数也仅为0.624。这说明不管溶洞中充填物是流体或是半流体,用常规地震频带的反射波,可以得到高度低于10 m(甚至2~3 m)的溶洞的强反射振幅异常,充填含流体的松散泥砂的溶洞,其高度大于10 m时,也能形成强反射。而溶洞中充填的泥沙若已成岩,则无论洞高多大,其反射波振幅也均小于高度3 m充填流体溶洞反射波的1/2。

4 实例

4.1 塔河连片三维区

从FDCA异常剖面图(图2)可以看出,FDCA异常主要集中在风化面以下100 ms范围内,且多集

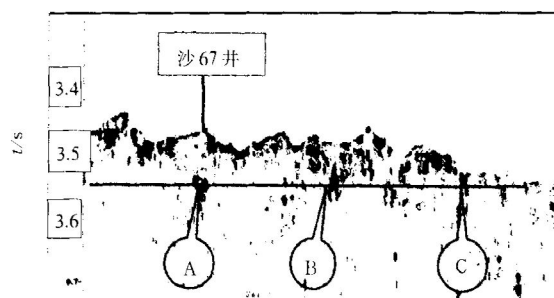


图2 塔河连片三维 inline343 线频率差异相关异常(FDCA)剖面

Fig. 2 FDCA slice of continuous 3-D inline 343 line in Tahe Oilfield

中在风化面附近, 表现出: (1) 从风化面往下, FDCA 异常呈现上宽下窄的漏斗状形态; (2) 在“漏斗”底部, 某一等时线上(即同一水平条带上), 还分布有强弱不同的 FDCA 异常; (3) 异常可在风化面的高部位出现, 也可能在斜坡或低部位上出现, 还可分布在风化壳内部较深的部位(约 100 ms)。这反映了风化面附近为近地表岩溶风化带, 其下为垂直方向的渗流溶蚀带, 随着深度增加, 溶蚀作用主要表现为近水平方向的潜流溶蚀现象。

在振幅相关异常的等时切片上(图 3), 可以看到, 同一切片上, 不同部位的 FDCA 异常强弱不同, 反映了溶洞的平面展布的差异。

在 FDCA 异常的水平时间切片彩图上, 还可以看出以多个红色表示的强异常与绿色和深蓝色表示的弱异常可以连接成弯曲的形状, 它们很可能表示大部分已经垮塌或充填的古暗河; 同时也可以看到落水洞和风化面附近的岩脚洞; 还可以看到 3 个

异常分属两条古暗河(图 3)。



图 3 塔河连片三维水平时间切片(时间: 3 554ms)

Fig. 3 Horizontal time slice(3 554 ms) of FDCA in Tahe Oilfield

上述现象反映了溶洞分层分区特征和纵向相通、横向相连的特征, 比较好的表现了地下岩溶分布状况。

4.2 S48 井区

过 S48 井的 FDCA 异常显示该井区为岩溶发育的风化面高部位(图 4a)。在 S48 井旁, 风化面下有 4

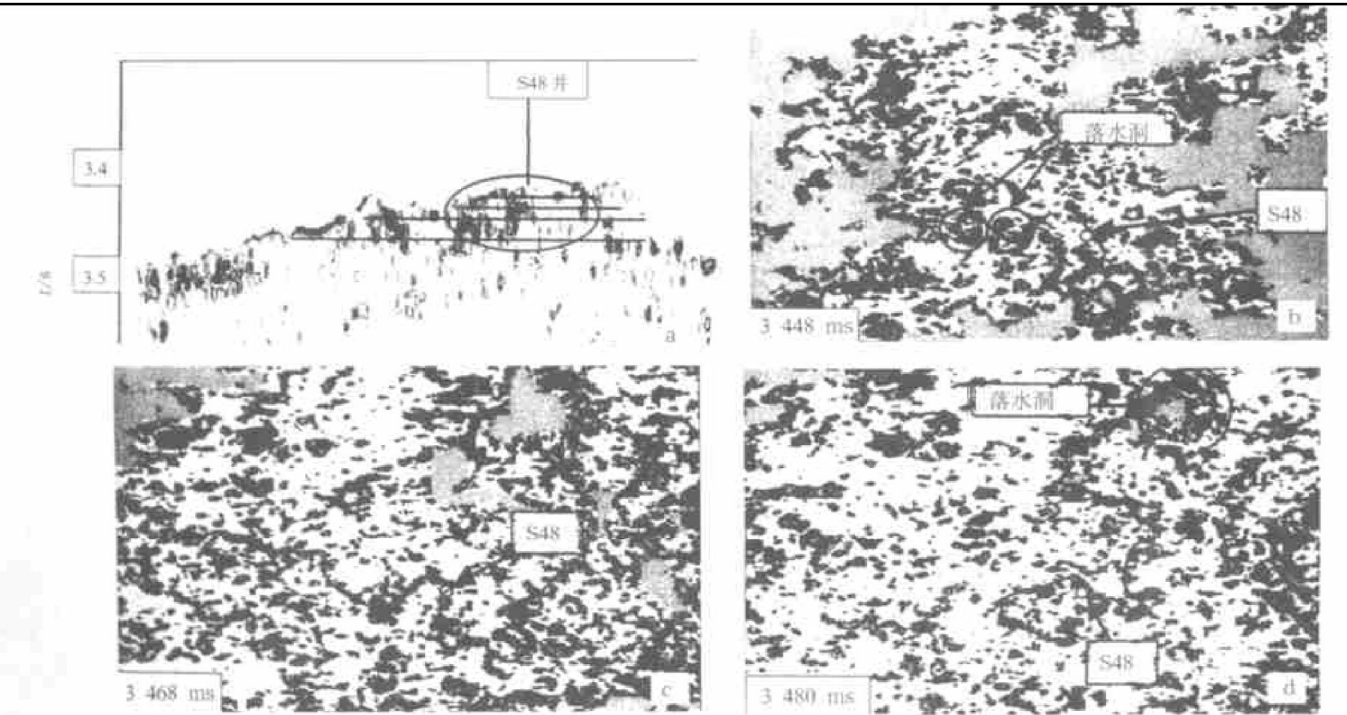


图 4 S48 井的 FDCA 异常剖面图(a)和等时切片(b, c, d)

Fig. 4 Abnormal profile and isochronic slice of FDCA in S48 Well

层 FDCA 异常。从时间分别为 3 448 ms, 3 468 ms, 3 480 ms 的 3 个时间等时切片可以看出, 在 S48 井的下方存在不同深度和不同延伸方向的古暗河, 同时也可以看到落水洞和脚洞(图 4b, c, d)。风化面

下发育 4 层古暗河, 就揭示了 S48 井 3 年来高产稳产、累计产油 $60 \times 10^4 \text{t}$ 的原因。

参 考 文 献

1 唐文榜. 地震反射法中薄煤层分辨能力的研究[J]. 地球物理学报, 1987, 30: 641~ 652

ANALYTIC TECHNIQUE OF FREQUENCY DIFFERENCE FOR DISCRIMINATION OF CAVITY FILLERS

Tang Wenbang¹ Liu Laixiang¹ Fan Jiafang¹ Han Gehua² Ma Xuejun²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing;

2. Plan and Design Institute of Northwest Petroleum Bureau, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang)

Abstract: The key of searching for carbonate reservoirs is to find large solution cavities full of fluids. Using frequency difference analysis can identify the nature of the cavity fillers. When the cavity filler is fluid, it has intense amplitude, low velocity and tuning property; when the filler is quasi-viscous fluid, its tuning reflection is 90% of absolute reflection; when the filler is loose deposit, its tuning reflection is 77% of the absolute reflection. These media are most possibly oil preserving bodies. When the master frequency focuses 20~30Hz, and the cavity height is higher than 2~3m, the nature of the filler could be easily identified. This technique was used in Tahe Oilfield, four horizons of underground fossil river channels were discovered under the weathered surface in S-48 Well.

Key words: frequency difference; amplitude-frequency; solution cavity; filler; hydrocarbon pool, Tahe Oilfield

(上接第 40 页)

METHOD AND TECHNIQUE FOR PREDICTION OF SUPER-DEEP CARBONATE RESERVOIRS IN NORTH TARIM BASIN

Li Zongjie¹ Wang Qinchong²

(1. Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan; 2. Research Centre of Engineering and Technology, Northwest Petroleum Bureau, Urumqi, Xinjiang)

Abstract: The Carbonate reservoirs of Tahe Oilfield in North Tarim are characterized by large buried depth, weak seismic reflection signal and high heterogeneity. Three methods could be used to predict this kind of reservoirs: 1. use seismic horizon flattening technique to restore fossil landform; use seismic attribute parameters to restore fossil water system. Then predict the karst reservoir developed position; 2. use the parameters of coherence, amplitude, wave impedance inversion and constrained logging to analyze the validity of the reservoir; 3. use pattern recognition technique to predict reservoir's oil and gas potential, including histogram, 2-D cross plot and 3-D cross plot. The practice has proved that the predicted distribution areas of available carbonate reservoirs fit well with the actual ones, and the coincidence is 70%~80%.

Key words: fossil landform; fossil water system; amplitude extraction; coherent calculation; wave impedance inversion; pattern recognition; multi-parameter analysis