

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0093- 04

塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及频率差异分析

王者顺^{1,2}, 王尚旭¹, 唐文榜³

(1. 石油大学资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石化新星公司, 北京 100083;

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 通过对溶洞复合反射系数的系统研究, 得出其地震响应具有振幅强、速度低和调谐性的特点, 并对强反射形成的条件及不同充填物溶洞的反射特征进行探讨, 认为在常规频率(20~ 30 Hz)的地震资料中可以观察到溶洞产生的强反射波。根据溶洞高度及充填物性质与信号频率之间的关系, 研究开发了一种以波动方程为基础的频率差异分析预测技术。在塔河油田的应用表明, 该技术可以从主频为 20~ 30 Hz 的常规地震资料中提取埋深 5 000 m 以上、宽度 100 m 以上、高度 3 m 以上的充填流体的溶洞的振幅-频率和速度-频率异常, 异常表现出分区、分层和纵横向连通的特征。据此可预测溶洞的存在及其空间分布, 并估算其高度。

关键词: 碳酸盐岩; 溶洞油藏; 复合反射系数; 频率差异分析; 塔河油田

中图分类号: P631. 445. 92

文献标识码: A

Seismic response and frequency difference analysis of cavern-type reservoirs in carbonates in Tahe oilfield

Wang Zheshun^{1,2} Wang Shangxu¹ Tang Wenbang³

(1. University of Petroleum, Beijing; 2. Star Corporation of SINOPEC, Beijing;

3. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing)

Abstract: Systematic study of composite reflectance coefficient of solution cavity shows that the seismic response is characterized by strong amplitude, low velocity and harmonization. This paper discusses the conditions of occurrence of strong reflectance and the reflectance signatures of cavities with different filling materials, and believes that strong reflectance waves can be observed in seismic data with normal frequency (20~ 30 Hz). According to the relationship between height of cavity, property of filling material and signal frequency, a frequency difference prediction and analysis technology is developed on the basis of wave equation. Its application in Tahe oilfield shows that this technology can get amplitude-frequency and velocity-frequency anomalies in cavities filled with fluid at a burial depth of over 5 000 m, with over 100 m width and over 3 m height from normal seismic data with predominant frequency of 20~ 30 Hz. The anomalies appear in different zones and different layers with vertical and lateral communications. They can be used as the basis for determining the existence of cavities, their distribution and estimating their heights.

Key words: carbonates; cavern-type reservoir; composite reflectance coefficient; frequency difference analysis; Tahe oilfield

碳酸盐岩储层的物性主要是受孔隙、洞穴及裂缝的控制。孔隙和洞穴是存储油气的良好空间, 而裂缝的发育又可将孔隙、洞穴连通起来, 成为统一的孔隙-洞穴-裂缝系统, 既可储存丰富的油气, 又可造成便于油气流动的高渗透带。特别是裂缝-溶洞组合类型因连通性好、储集空间

巨大而最具勘探价值^[1~ 3]。

1 概况

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起区阿克库勒凸起(亦称轮南凸起)南部, 在新疆维吾尔自治区轮台县和库车县境内, 因依塔里木河北岸而得

名。截止1999年底,塔河油田已探明油气地质储量 1.1×10^8 t,成为塔里木盆地第一个被证实的地质储量超亿吨的大型油田,也是中国第一个海相自生自储的大型油田^[2]。

勘探实践表明,塔河地区是一个奥陶系、石炭系、三叠系3套含油层系叠合连片的大型油气田。其中奥陶系碳酸盐岩的油气占该区已探明储量的近90%。下奥陶统风化面以下250 m范围内整体含油,储集空间类型包括裂缝、孔洞、溶洞和原生孔隙。区内近1/3的井在揭开奥陶系风化壳时发生放空、钻压下降、泥浆大量漏失等情况,反映钻遇大容积储集空间。因此,准确预测碳酸盐岩溶洞的分布、规模以及充填物的类型成为塔河油田油气勘探开发的重要内容和当务之急。在现有条件下,地震勘探因其资料丰富,技术手段灵活多样,成为岩溶油藏预测的首选^[4~11]。

2 地震响应

采用地震方法预测岩溶首先要清楚其地震响应特征,特别是具体地质条件下地震响应与溶洞尺度、充填物之间的关系^[12,13]。

在塔河油田,下奥陶统碳酸盐岩上覆中上奥陶统和石炭系。石炭系和中上奥陶统上部为层状介质;中上奥陶统下部和下奥陶统碳酸盐岩的骨架岩石可视为均匀介质,但因岩溶风化形成缝孔洞而呈现非均质状态,非均匀程度与缝洞中充填物性质有关。下奥陶统碳酸盐岩的缝孔洞中充填

物有以下几种可能:①流体(水或油、稠油),②疏松的泥沙(含流体),③较致密泥沙,④砂泥岩(充填泥沙成岩),⑤其他。充填物不同,缝孔洞的地震响应特征也将不同。

2.1 复合反射系数的数学表达式

研究表明,当溶洞顶底面间高差大于四分之一波长时,顶底面的反射波时间上彼此分离,其振幅与顶底面的反射系数 r 成正比。当高差不大于四分之一波长时,顶底面的反射波会叠合在一起,形成复合反射波。反射波的强度与溶洞顶底面的复合反射系数成正比^[9]

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

式中 R 为溶洞顶底面的复合反射系数,定义为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 为溶洞顶底面的反射系数; λ 为溶洞充填物中传播的地震波波长。

2.2 充填物的地震反射特征

2.2.1 流体

在塔河油田,碳酸盐岩的密度为 $2.5 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$,纵波速度为 $5\,500 \sim 6\,000 \text{ m/s}$,溶洞中流体的密度为 1.0 g/cm^3 ,纵波传播速度小于 $1\,500 \text{ m/s}$ 。经系统地计算和分析,我们认为充填流体的溶洞的复合反射波具有以下几个特征。

2.2.1.1 振幅强

根据(1)式计算了不同频率条件下,不同高度充填流体溶洞的复合反射系数 R (表1)。

表1 25 Hz和50 Hz时,不同高度溶洞的复合反射系数

Table 1 Composite reflectance coefficient of cavities with different heights at 25 Hz and 50 Hz

频率/Hz	不同高度下的复合反射系数							
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	7.5 m	10 m	15 m
25	0.421	0.518	0.808	0.875	0.919	0.953	0.968	0.976
50	0.679	0.875	0.934	0.957	0.968	0.976	0.968	—

表1说明,溶洞中充填流体(液体)时,能够形成很强的复合反射波。在频率为25 Hz时,15 m高的溶洞的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倍以上,即使4~5 m高的溶洞(相当于1/15波长),其复合反射波的振幅也相当于灰岩与砂泥岩界面反射波的3倍以上。

2.2.1.2 速度低

溶洞中充填的流体速度很低,比其围岩碳酸盐岩低 $4\,000 \text{ m/s}$ 左右。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流体的速度;但其高度小于1/4波长时,反演速度值会增大,但仍然低于碳酸盐岩的速度。

2.2.1.3 调谐性

一定高度的溶洞,不同频率的反射波(绕射波)振幅不同,其中某一频率的复合反射系数取得最大值,此频率即为调谐频率;另一方面,同一频率,不同高度的溶洞其复合反射系数各不相同,但在某一高度时复合反射系数为最大,此溶洞的高

度即为调谐高度。利用溶洞的这种调谐性,就可提取频率差异异常,研究溶洞空间分布情况。

2.2.2 其他充填物

由于下奥陶统碳酸盐岩经历数亿年的漫长地质年代和极高的静压力,其中的岩溶缝洞可能坍塌,也可能充填碎屑物质。高压可使充填流体的密度加大、波速增高,或使充填的碎屑物质压实甚至成岩。这些都会使溶洞壁的反射系数减小,反射波减弱。通过计算,我们将溶洞中充填不同填充物时,溶洞壁反射系数及调谐复合反射系数的变化示于表 2。

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

Table 2 Composite reflectance coefficient of cavities with a height of 1/4 wave length and filled with different materials

岩 性	V_l ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	ρ_l ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	R
碳酸盐岩	5 500	2.5	
流 体	1 500	1.0	0.8
半 流 体	2 000	1.5	0.64
疏松层含流体	2 500	2.0	0.47
较致密层含流体	3 000	2.2	0.35
致密层不含流体	4 000	2.4	0.178

r —溶洞顶底面反射系数; R —高度为四分之一波长的溶洞复合反射系数

表中“半流体”用于模拟高压条件下速度和密度增高的稠油。“含流体的松散层”模拟溶洞中充填的含流体泥沙沉积物,由于溶洞顶的支撑,未经受高压而表现为疏松状态。“较致密层”和“致密层”模拟在高压条件下成岩性孔隙度不同的充填物。

可以看出,充填流体时,溶洞的调谐反射最强,近乎为绝对反射;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%,而这几种情况,都很可能对应于油藏。

2.3 反射波强度与溶洞高度

在塔河地区,目的层下奥陶统碳酸盐岩埋深 5 000 m 以上,地震反射波的主频在 20~ 30 Hz,溶洞高度一般小于 10 m,明显小于调谐厚度,能否形成强反射还须进一步研究。

根据(1)式可以计算出 $R-h$ 关系曲线,如图 1 所示, r 值分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9。当 r 为 0.7 和 0.9, 曲线两侧较陡, 极值部分平缓, 表明高

度很小($h \ll \lambda$) 的溶洞也能形成强反射。

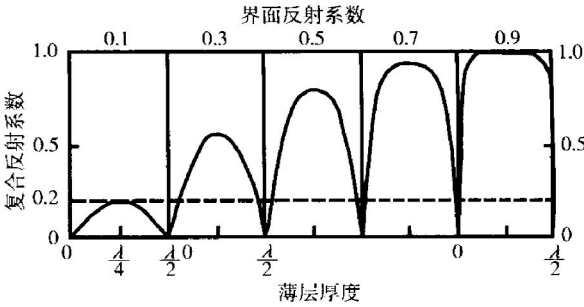


图 1 薄层复合反射系数与溶洞高度的关系

Fig. 1 Composite reflectance coefficient of thin layers vs. height of cavities

取复合反 射系数 $R = 0.707$ 为 强反射的标准,从(1)式可以推算出不同充填物的溶洞形成强反射所需高度的表达式

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

计算表明,充填流体的溶洞只需很小的高度就可以产生强反射,充填半流体和泥沙的溶洞则需要较大的高度,若充填泥砂已成岩,无论溶洞多高都不会产生强反射。这表明在常规的地震资料中可以识别高度小于 10 m,甚至是 2~ 3 m 的溶洞产生的强振幅异常。

塔河油田下奥陶统碳酸盐岩具有弱反射特征,溶洞发育区可在常规频率(20~ 30 Hz)下观测到溶洞的强反射波。

(1) 溶洞高度和信号频率一定时,反射波振幅与充填物有关,充填流体时最强,充填砂泥岩时最弱,两者相差 3 倍以上。

(2) 信号频率和填充物质一定时,反射波振幅随溶洞高度而变,据此可以估算溶洞高度。

(3) 将地震资料做速度反演,溶洞反射呈低速特征。当溶洞高度大于调谐高度时,反演速度值与充填物的波速相同;溶洞高度小于调谐高度时,反演速度大于充填物的波速。反演速度与围岩速度之差随高度减小而减小。

3 频率差异分析

3.1 基本思想

频率差异分析(Frequency Diversity Analysis, 简记为 FDA)就是根据溶洞的地震响应特征,在不同高度溶洞的地震反射波中提取不同频率成分反射

波的振幅,并辅以反演速度,得到溶洞的振幅-频率异常和速度-频率异常,用以圈定溶洞位置,定性或半定量估算溶洞高度,对溶洞型油藏进行较准确的预测^[9, 12~15]。

3.2 实现方法

频率差异分析技术的核心是提取溶洞反射的振幅-频率属性,辅以速度-频率属性,据此圈定溶洞的空间展布规律,定性或半定量估算溶洞的高度。FDA 技术的流程如图 2 所示。首先要确认下奥陶统碳酸盐岩风化壳的反射,使之与上覆地层的反射分离。其次选择不同频率进行 FDA 分析,圈定出 FDA 的振幅和速度异常,然后进行异常幅值分析,估算溶洞高度。

3.3 应用效果

实践中, FDA 技术的资料是异常的剖面图和平面图,重点是频率差异振幅相关异常(Frequency Diversity Coherence Anomaly, 简记为 FDCA)。

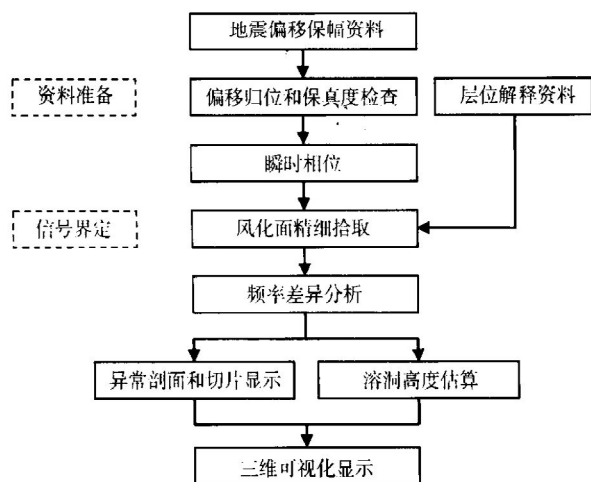


图 2 溶洞型油藏预测的频率差异分析流程示意图

Fig. 2 Flow chart of frequency difference analysis for prediction of cavern-type reservoirs

图 3 是塔河油田 Inline343 线 FDCA 剖面图。可以看出, FDCA 异常主要集中在风化面以下 100 ms 范围内,且多集中在风化面附近。特点为: (1) 从风化面往下,异常呈现明显的串珠状; (2) 在串珠的等时的条带上分布有多个强弱不等的异常; (3) 异常存在于风化壳的高点、低点、斜坡及内部(约 100 ms) 等不同的部位。异常的这些特征较好地反映了碳酸盐岩风化壳的垂直渗流溶蚀和水平径流溶蚀的特征。

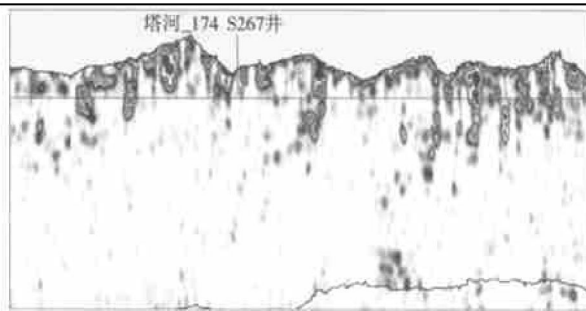


图 3 塔河油田 Inline343 线 FDCA 剖面图

Fig. 3 FDCA section along inline 343 line in Tahe oilfield

图 4 为塔河油田 6 区的 FDCA 平面图。显示出 FDCA 异常平面展布特征。反映溶洞的异常横向上相互连通,组成暗河。S67 和 S65 井在暗河近旁,酸化压裂后油产量分别从 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $0 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $463 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $337 \text{ m}^3/\text{d}$ 且持续高产;而 S66 井附近,异常稀少切量值较小,酸化压裂前后油产量分别为 $0 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $109 \text{ m}^3/\text{d}$,断续产油。据 4 个月的统计,三口井产油量分别为 $28\,318 \text{ m}^3$, $12\,098 \text{ m}^3$ 和 $6\,537 \text{ m}^3$ 。

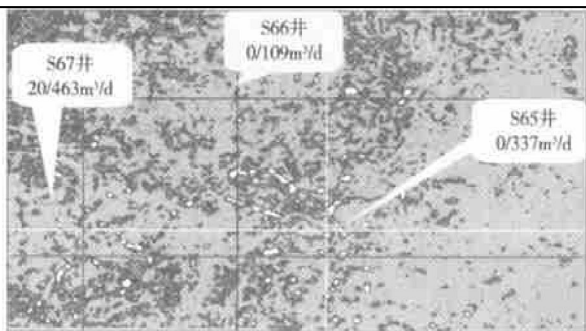


图 4 塔河油田 6 区的 FDCA 平面图,图中标注了各井的酸化压裂前后日产油量

Fig. 4 FDCA map of block 6 in Tahe oilfield with daily oil production of each well before and after acidizing and fracturing treatments

参 考 文 献

- 1 邱中建,康竹林,何文渊. 从近期发现的油气新领域展望中国油气勘探发展前景[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 1~6
- 2 张抗. 塔河油田性质和塔里木碳酸盐岩油气勘探方向[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 1~6
- 3 陈清华,刘池阳,王书香,等. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 196~202
- 4 唐文榜,刘来祥,樊佳芳,等. 溶洞充填物判识的频率差异分析技术[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 41~44

(下转第 101 页)

表 3 注入水与地层水反复驱替后渗透率表

Table 3 List of permeability after repeatedly displacing formation water with injection water

流体类型		饱和地层水	注入水	地层水	注入水	地层水	注入水	地层水	注入水	地层水
驱替数/次		—	1	2	3	4	5	6	7	8
体积/PV		2	4	2	4	2	4	2	4	2
渗透率 $/ (10^{-3} \mu\text{m}^2)$	模型 1	7.37	6.68	5.30	4.11	3.95	3.64	3.32	2.99	2.1
	模型 2	4.68	3.52	0.79	0.48	0.37	0.21	0.17	0.18	
	模型 3	1.74	1.58	0.87	0.84	0.58	0.54	0.21	0.26	
渗透率降低 百分比/ %	模型 1	—	9.4	28.1	44.2	46.4	50.6	55.0	59.4	71.5
	模型 2	—	24.8	83.1	89.7	92.1	95.5	96.4	96.2	—
		模型 3	—	9.2	50.0	51.7	66.7	69.1	88.2	85.3

4) 当 pH 大于 8.35 时,铁进入腐蚀钝化区,防止了铁的腐蚀,保证了除垢的同时,有效保护了输管线及其采油设备。

5) 储层岩石中所含的多数成垢离子矿物,容易在酸性介质中与地层水发生反应。经处理后的混合水呈弱碱性,可有效抑制水岩反应的发生,使储层岩石的成垢离子不再频繁地从岩石中溶解而进入地层水。地层水中成垢离子的浓度将不再随注水开发进程而增大,使其步入良性循环轨道。

6) 该方法不但防止了油层结垢伤害的产生,解决了集输管线及其采油设备的结垢与锈蚀问题,还可以实现油田污水再利用,从而大大降低采油成本。不失为一个较为理想的、经济实用、切实有效的防垢方法。

参 考 文 献

1 舒福昌,余维初,梅平. 宝浪油田注水结垢趋势预测及试验验证[J]. 江汉石油学院学报,2000,22(3): 87~ 89

2 关德,杨寨,魏光华. 油田注水系统结垢趋势预测及防垢研

究[J]. 油田化学,2001,18(2): 136~ 138

3 刘斌,杨琦,谈士海. 台兴油田注水水质对储层的伤害和对策[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1): 87~ 96

4 Paulo J, Mackay E J, Menzies N, et al. Brine mixing complicates Alba field scale management [J]. Oil Exploration Technology, 2001, 99 (35): 79~ 91

5 Dyer S J, Graham G M. The effect of temperature and pressure on oil-field scale formation[J] Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, 35: 95~ 107

6 吴明,雷良才,刘水. 大庆采油五厂注水系统地面管线结垢原因研究[J]. 油田化学,2000,17(4): 321~ 326

7 李洪建,陈一健,王淑娣. SZ36- 1 油田三种水源水混注的实验研究[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(4): 33~ 36

8 潘爱芳,曲志浩,马润勇. 注水开发中油层结垢伤害机理与防治措施[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(4): 6~ 8

9 周根陶,郑永飞. 碳酸钙矿物低温化学合成及其同质多象转变矿物学机理研究[J]. 地质科学,2000, 5(3): 325~ 335

10 陈友明,王秀兰,沙庆安,等. 室温常压下 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 体系的试验研究[J]. 地质科学,1979, (1): 22~ 36

11 张汉武,张立桅,林冰,等. 废水处理系统结垢现象的研究[J]. 化工生产与技术,1995, (7): 24~ 28

12 孔令荣,曲志浩. 砂岩微观模型两项驱替实验[J]. 石油勘探与开发,1991,18(3): 22~ 36

(上接第 96 页)

5 王永刚,李振春,邵雨. 利用地震资料预测储层裂缝发育带[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 79~ 82

6 周路,白玉雷,李洪辉. 应用地震低速异常带特征研究轮南地区奥陶系古岩溶[J]. 石油勘探与开发,1998, 25(1): 29~ 31

7 何发岐,周家驹,云露. 塔里木盆地塔河油田油气勘探新技术[J]. 石油实验地质,2001, 23(3): 318~ 323

8 倪逸,杨慧珠,任颖. LDVR 方法在塔里木盆地油气勘探中的应用探讨[J]. 石油地球物理勘探,1998, 33(2): 272~ 277

9 唐建明. 塔河油田石炭系储层油气预测方法[J]. 石油地球物理勘探,2002, 37(4): 343~ 348

10 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J]. 石油与天然

气地质,2002, 23(3): 262~ 265

11 李宗杰,王勤聪. 塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术[J]. 石油与天然气地质,2002, 23(1): 35~ 40

12 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(6): 641~ 652

13 李洪辉,周东延,从祝安. 塔里木盆地地震反射异常体及其地质属性初探[J]. 石油勘探与开发,2001, 28(2): 50~ 52

14 吴欣松,王福焕. 圈闭评价技术及其在塔里木盆地的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版),1999, 23(3): 13~ 17

15 李翎,魏斌,贺铎华. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层的测井解释[J]. 石油与天然气地质,2002, 23(1): 49~ 54