

文章编号:0253-9985(2007)06-0836-05

塔河油田南部缝洞储层的正演模拟及地震波场特征

黄绪宝¹, 顾汉明²

(1. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要:塔河油田奥陶系碳酸盐岩非均质缝洞储层的地震响应特征复杂, 而利用正演模拟技术模拟这种介质中传播的地震波的特征能为孔缝洞储层的预测提供理论依据。利用塔河油田南部的钻井资料, 基于连续随机扰动模型, 用阈值截取法模拟、构造各种不同的随机溶洞介质模型; 利用联井地震剖面, 建立接近实际的岩溶缝洞型储层地震-地质模型; 利用非均匀介质的地震波场正演模拟技术, 获得自激自收剖面及叠偏剖面。在此基础上, 总结出了缝洞型储层的地震响应特征。

关键词:地震响应特征; 正演模拟; 缝洞储层; 塔河油田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Forward modelling and seismic wave field characteristics of fractured-vuggy reservoirs in the southern part of Tahe oilfield

Huang Xubao¹, Gu Hanming²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The characteristics of seismic response from the heterogeneous Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield are complicated. However, the forward modelling technique can be used to simulate the characteristics of seismic wave propagating through this kind of reservoirs and provide a theoretical principle for fractured-vuggy reservoir prediction. With drilling data from the southern part of Tahe oilfield, different random cavity-medium models were established through threshold truncation and continuous random perturbation modes. Seismic well-tie sections were also used in the construction of the seismic-geologic model that works better in simulating the real karst fractured-vuggy carbonate reservoirs. Pseudo zero offset section and stacked migration section were obtained through forward modelling of seismic wave field in heterogeneous medium. On these bases, the seismic response characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoirs were summarized.

Key words: characteristic of seismic response; forward modelling; fractured-vuggy reservoir; Tahe oilfield

塔河油田是目前中国石油化工股份有限公司最大的资源接替和建产、上产阵地, 其主要开发目的层为奥陶系碳酸盐岩缝洞储层。受构造、岩溶、古地理环境等因素的影响, 岩石基质均匀、致密, 孔隙度低, 渗透性差, 缝洞空间分布极不均匀, 且缝洞中的充填状态和性质各不相同, 储层地震响应特征复杂, 储层预测多解性严重。前人对该区

缝洞储层的地震响应特征进行了总结, 得到一些具有指导意义结论^[1-4]。而利用正演模拟技术模拟这种介质中传播的地震波的特征, 能为孔缝洞储层的预测提供理论依据。本文利用塔河油田南部的钻井资料, 建立了岩溶缝洞型储层的地震-地质模型, 并利用非均匀介质的地震波场正演模拟技术, 总结出了缝洞型储层的地震响应特征。

收稿日期: 2007-11-01。

第一作者简介: 黄绪宝(1960—), 男, 教授级高级工程师, 地震资料解释及储层预测。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司先导项目《塔河油田南部开发地震应用技术》。

1 岩溶缝洞型储层地震-地质模型的建立

1.1 塔河南缝洞储层的统计特征

鲁新便等人对塔河油田钻井钻遇的奥陶系储层共 209 段进行了统计,图 1 显示出各溶洞发育的高度范围对应的层段数统计图。结果表明,各储层段溶洞发育的高度成不均匀分布,储层段溶洞发育的高度范围绝大部分小于 9 m,有 59 段未充填,149 段有充填物,其中砂泥质充填 97 段,有 34 段属于半充填或部分充填,基本上有 2/3 的岩心段有充填或部分充填。

1.2 缝洞型储层地震-地质模型的建立方法

缝洞型储层是由裂缝和多孔介质组成的储集体。多孔介质的结构特征可概括为^[5]:①多孔介质是带有许多微小孔洞的固体,固体是孔洞的骨架;②孔洞之间互相连通或是部分连通;③孔洞的

一系列的小孔可能组成较大的洞;反之,连通性差,则表明储集体内孔洞分布较分散,较大的洞是由一系列的小孔组成的,而小孔间由岩石骨架隔开。

基于塔河南缝洞储层的统计特征我们可以认为,缝洞型储层中的孔洞是由众多随机分布的小洞(直径小于 5 m)按不同的连通性、不同的小洞数(孔洞在整个储层体积内所占有的百分比)组成。为此,本文将多尺度随机介质模型应用于塔河油田缝洞储层地震-地质模型的建立^[6-11]。所谓随机介质模型,就是将介质参数表示为一个背景参数值再加上一个非均匀扰动量(随机扰动量)。最常使用的随机介质模型是高斯型和指数型随机介质模型,即利用高斯型和指数型自相关函数模拟出的连续随机介质模型。

基于连续随机扰动模型,用阈值截取法按如下步骤模拟、构造各种不同的随机溶洞介质模型:

- 1) 确定缝洞储层模型(缝洞分布区)的中心点坐标 $M_0(x_0, y_0)$;
- 2) 选定缝洞分布区的大小 R (矩形的长和

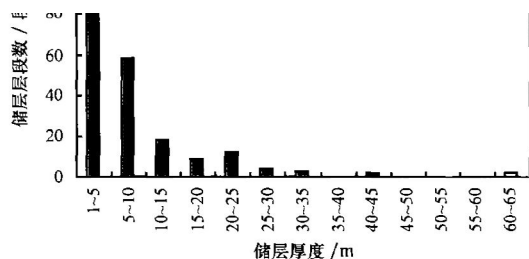


图1 塔河油田奥陶系各储层段溶洞发育的高度范围对应的层段数

Fig.1 Numbers of layers corresponding to the cavity height in each interval of the Ordovician reservoirs in Tahe oilfield

- 6) 若溶洞区域的 S_0 面积达到要求,即在该溶洞分布区中的溶洞密度等于 p ,则停止,否则转下一步;

- 7) 若溶洞密度大于 p ,则令 $V_{\min} = \bar{V}$,否则若溶洞密度小于 p ,则令 $V_{\max} = \bar{V}$,然后转到步骤4。

基于缝洞储层的这些统计特征,就可以按上述步骤构造出不同形式的溶洞介质储集体模型,而如果加入基于裂缝参数确定的各向异性系数,就可以构成缝洞储层模型。图2显示的模型为球体直径 80 m,小孔密度分别为 10%,20%,30%,60%,80%,孔洞连通性中等的储层模型。图3显



图2 小孔密度递增的球状随机储层模型

Fig. 2 Spherical random reservoir model with increasing pore density



图3 连通性由差到好的球状随机储层模型

Fig. 3 Spherical random reservoir model with connectivity changing from bad to good

示的模型为球体直径 100 m, 小孔密度为 40%, 孔洞连通性从小到大(自相关由小到大)变化的储层模型。

2 缝洞型储层地震-地质模型的正演模拟方法

地震波场正演使用非均匀介质条件下导出的弹性波波动方程,并基于高阶差分格式,考虑初始条件和吸收边界条件,用有限差分法求解,可以得到缝洞储层模型的理论合成地震波场记录,供波场特征分析使用。

3 溶洞储层模型的地震响应特征分析

我们对建立的各类形状的溶洞储集体模型,利用地震波场正演模拟方法模拟出自激自收地震记录,基于 45° 有限差分波动方程偏移后的剖面,来研究不同溶洞储集体大小、不同形态、不同洞穴密度、不同洞穴离散度、不同充填物组合下的地震

波场特征。本文主要以球状溶洞储集体为例,说明地震波场特征分析方法。

3.1 相同大小的溶洞储集体内洞穴密度不同的地震波场特征

图4为对应图2显示模型的合成地震记录偏移剖面,孔洞内分别充填流体和较致密物。该图表明,随着小孔密度的增加,振幅增强。储层顶界面反射较清晰,储层内反射同相轴从杂乱性渐渐变成连续性差的特征;储层底部反射同相轴存在时间下拉现象,内部由强、弱相间的不规则反射短同相轴组成。而且,孔洞内充填流体的记录振幅比充填较致密物的记录振幅要强 100%。

注意到在小孔密度较小而且孔洞内充满流体时,反射多次波现象严重,反映在偏移剖面上存在偶极振荡现象;相反,在孔洞充满较致密物时,反射多次波现象不严重,在偏移剖面上偶极振荡现象不明显。这也进一步说明,实际地震记录上的串珠状反射,通常是中等连通的一系列充满流体的小孔洞及岩石骨架组成的集合体的反射特征。

3.2 叠层状储层有效厚度由大到小的溶洞储集体的地震波场特征

图5显示的模型为两层饼状模型,顶、底高度为 80 m,两个饼之间的间隔从 10 m 变化到 60 m,即储层的有效厚度从 70 m 递减变化到 20 m,储层内小孔密度为 40%,为孔洞连通性中等的储层模型以及合成地震记录。该图表明,储集体的高度不变时,随着储层的有效厚度变小,孔洞顶、底反射比较清晰,但多次波反射比较严重,储层内反射同相轴数从少到多又变少,偶极振荡在饼间隔 30 ~ 40 m 时比较明显,说明偶极振荡现象的出现与储层的有效厚度及孔洞大小密切相关。

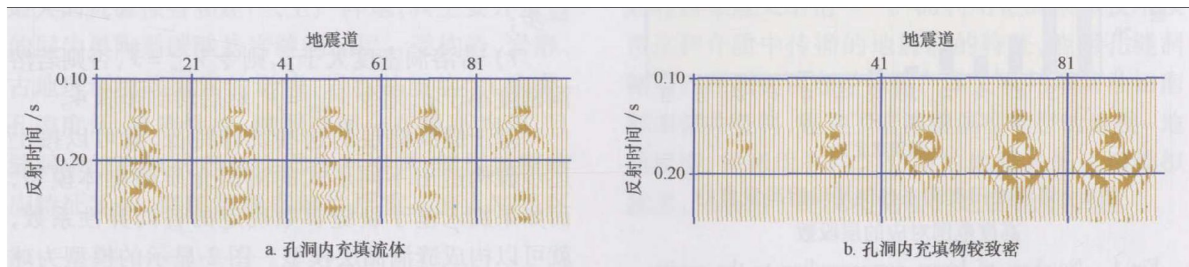


图4 与图2模型对应的合成记录偏移剖面

Fig. 4 Synthetic seismogram offset profile corresponding to the model in Fig. 2

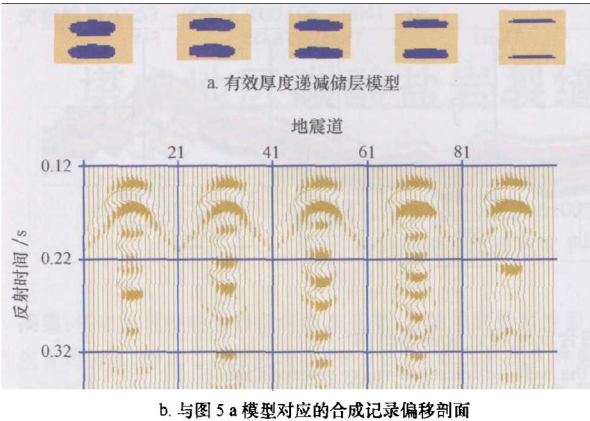


图5 厚度变化下的两层饼状模型及其合成地震记录
Fig.5 Two-layer pancake model with varying thickness and its synthetic seismogram

3.3 裂缝储层模型的地震响应特征

裂隙介质通常是用裂隙密度来表示裂隙的强度。基于裂隙介质中弹性常数的计算方法,我们可以设计裂隙储层模型。所设计的裂隙模型为潜山顶面下风化层下灰岩内的裂隙储集体模型,裂隙所处的介质为奥陶系灰岩,其密度为 2.73 g/cm^3 ,纵波速度为 $6\,000\text{ m/s}$,横波速度为 $4\,200\text{ m/s}$,裂隙密度变化率分别为 $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 m^{-1} ,

裂隙储集体距风化层顶面距离为 120 m ,裂隙储集体宽度为 150 m 、高度为 60 m 。图6为对应模型的合成地震记录偏移剖面。从图中可以看出,裂缝产生的振幅相对较弱。对于裂隙密度较小的裂缝带,在偏移剖面上几乎不能判定裂隙的存在;而随着裂隙密度的增大,在偏移剖面上裂缝表现的异常愈明显。在风化层顶界面反射下的低频复波,其范围与裂隙带宽度接近,而且裂隙带宽度愈大、能量越强,在裂隙带中心复波能量最强。

3.4 连井缝洞储层模型的地震响应特征

为了了解各井缝洞储层的地震响应特征,我们基于井旁地震记录(图7)设计了过TK721井—T702B井—TK611井—TK451井—TK455井—S48井的连井模型。其中,TK721井为距 T_7^4 较近的洞穴型储层;T702B井为距 T_7^4 较远的洞穴型储层;TK611井为 T_7^4 下方的缝洞型储层;TK455井为 T_7^4 下方的裂缝型储层;S48井为 T_7^4 下方有一定连通性的洞穴型储层。这些井之间还设计了不同发育程度的缝洞储层。该剖面也包括TK451井的非储层。下奥陶统灰岩的地震传播速度为 $6\,300\text{ m/s}$,缝洞储层的地震传播速度为 $5\,000\sim 5\,600\text{ m/s}$,选择雷克子波,主频为 25 Hz ,进行二维有限差分模

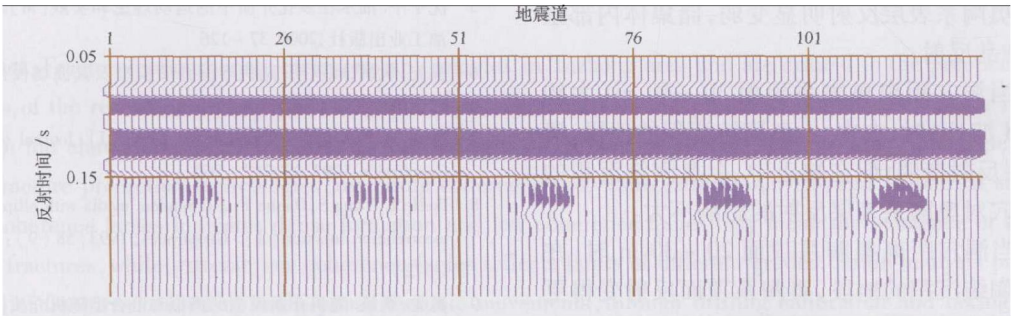


图6 裂隙储集体内裂隙密度不同情形下的合成地震记录偏移剖面
Fig.6 Synthetic seismogram offset profile of fractured reservoirs with different fracture density

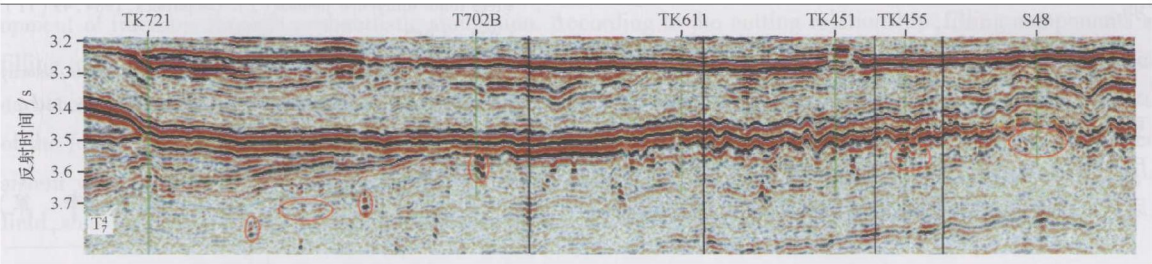


图7 连井实际地震偏移剖面
Fig.7 Actual well-tie seismic offset profile

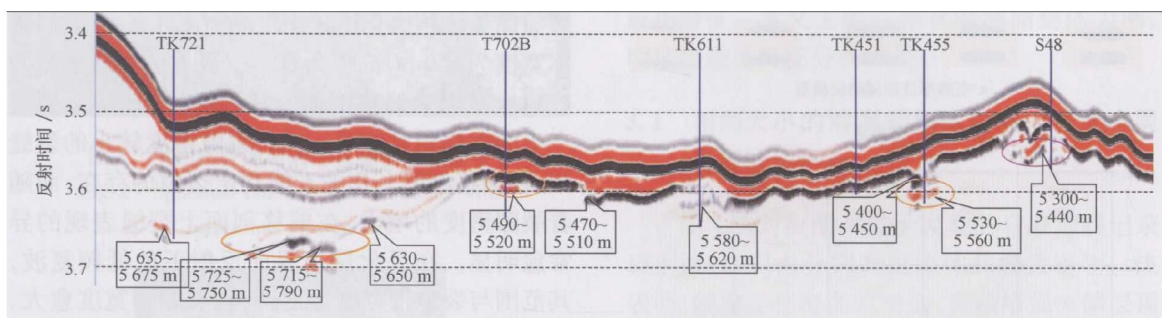


图8 连井缝洞储层模型的合成地震记录偏移剖面

Fig. 8 Synthetic seismogram offset profile of the well-tie fractured-vuggy reservoir model

拟。图8为对应模型的合成地震记录偏移剖面，波场特征分析见结论。

4 结论

1) 孔洞型储层反射能量较强,串珠状反射特征明显;裂缝型储层反射能量较弱,反射比较杂乱;而缝洞型储层反射能量也较强,但比孔洞型储层的反射能量要弱。

2) 洞穴对奥陶系顶界面的反射能量产生干涉,并且奥陶系顶界面的反射能量随着洞穴距离奥陶系顶面距离的减少而变弱。尤其由一系列洞穴不规则组合且由小裂隙连接、距离奥陶系顶面较近时,奥陶系表层反射明显变弱,储集体内部呈不规则杂乱反射。

3) 当洞穴距离奥陶系顶面 30 ~ 60 m (大约 $1/8 \sim 1/4$ 波长) 时,在中、上奥陶统沉积的地段,奥陶系表层反射变弱;但在缺乏中、上奥陶统沉积的地区,洞穴对奥陶系表层反射的影响不大。

4) 当洞穴距离奥陶系顶面 20 ~ 30 m 时,在中、上奥陶统沉积的地段,奥陶系顶面反射变得更弱,甚至形成反射中断;但在缺乏中、上奥陶统沉积的地区,洞穴及奥陶系表层的反射能量都变得较弱。

5) 当洞穴距离奥陶系顶面小于 20 m 时,在中、上奥陶统沉积的地段,奥陶系顶面地震反射变得更弱,且相位沿横向发生相移,频率变低,与洞穴反射相互叠加变为一个相位,同相轴下拉;但在缺乏中、上奥陶统沉积的地区,洞穴及奥陶系表层

反射能量都变得较弱。

致谢:实际模型的建立以及波场特征分析得到李宗杰、杨子川同志的指导,鲁新便、奚先同志参与了理论随机模型的建立,在此一并表示感谢!

参考文献

- 1 文晓涛,贺振华,黄德济. 缝洞岩层地震波反射特征分析[J]. 勘探地球物理进展,2003,26(2):99~102,108
- 2 韩革华,漆立新,李宗杰,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):860~870
- 3 闫相宾. 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
- 4 李明娟,张永贵,郭兴威,等. 塔河南部地区碳酸盐岩油气预测技术研究[J]. 石油与天然气地质,2006,27(4):536~541
- 5 沈平平. 油水在多孔介质中的运动理论和实践[M]. 北京:石油工业出版社,2000. 37~126
- 6 奚先,姚姚,顾汉明. 随机溶洞介质模型及其波场模拟[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):365~369
- 7 Korn M. Seismic wave in random media[J]. Journal of Applied Geophysics,1993,29:247~269
- 8 Ikelle L, Yung S, Daube F. 2-D random media with ellipsoidal autocorrelation function [J]. Geophysics, 1993, 58(9):1359~1372
- 9 奚先,姚姚. 随机介质模型的模拟与混合型随机介质[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2002,27(1):67~71
- 10 Virieux J. SH-wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite difference method [J]. Geophysics, 1984, 49(11):1933~1957
- 11 Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite difference method [J]. Geophysics, 1986, 51(6):889~901

(编辑 李 军)