

碳酸盐岩孔洞储层地震物理模型研究

李凡异^{①②} 魏建新^{*②} 狄帮让^② 潘文庆^③ 郑多明^③

(①中海油研究总院,北京 100028; ②中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

③中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000)

李凡异,魏建新,狄帮让,潘文庆,郑多明. 碳酸盐岩孔洞储层地震物理模型研究. 石油地球物理勘探,2016, 51(2):272-280.

摘要 根据塔里木 H 工区碳酸盐岩孔洞储层的地质地震综合解释成果,通过改进地震物理模型制作工艺,构建了一个与该区实际地层参数相近的三维碳酸盐岩孔洞储层精细物理模型。严格按照实际地震资料的采集参数和处理流程对物理模型进行了地震数据采集和处理,获得了与实际地震数据相匹配的物理模型地震数据体。最后,对孔洞储层的纵向分辨率、横向分辨率以及孔洞储层体积校正等问题进行了讨论:认为阻抗反演可有效提高孔洞储集体纵向识别能力;从物理模型研究的角度得到横向识别多洞的最小距离;利用物理模型数据建立了孔洞储集体校正量板,有助于实际孔洞储集体体积的估算。

关键词 碳酸盐岩 孔洞储层 地震物理模型 塔里木盆地

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.02.009

1 引言

塔里木盆地碳酸盐岩缝洞型油气藏逐步成为中国西部接替型油气藏,有广阔的勘探和开发前景。已有的研究表明,奥陶系石灰岩顶面以下 200m 范围内的潜山岩溶缝洞型储集体与内幕层间岩溶缝洞型储集体为主力储层^[1],根据储集体的形态、大小和组合方式不同,可将储层大致分为溶洞型、孔洞型、缝洞型和裂缝型储层^[2]。早期风化作用和后期构造运动导致了储层极强的非均质性,同时这种油气藏埋藏较深(大部分超过了 6000m);而且这种储层中非均质体尺度远小于地震反射分辨率,这些因素给储层地震识别带来了巨大挑战。

近年来,许多学者针对孔洞型储集体的地震响应特征做了正演模拟研究。姚姚等^[3,4]使用随机介质模型及非均质弹性波动方程,研究了不同宽度和高度溶洞的地震反射振幅特征,并提出以绕射波为基础的处理方法是解决成像问题的关键;吴俊峰等^[5]使用同样的数学正演方法,针对各种塌陷洞的

地震响应特征进行分析,提出了形成“串珠”现象的两个必备条件;闵小刚等^[6]采用非均匀介质二维弹性波波方程交错网格有限差分法,对塔河油田溶洞型储层模型进行数值模拟正演计算,分析了不同溶洞储层类型地震响应与物性参数之间的关系;郑四连等^[7]、吴永国等^[8]运用适合任意倾角且纵横向可变速的波场数值模拟方法对“串珠”状强短反射做了研究,认为溶洞间距离较小、溶洞杂乱分布时,溶洞与溶洞之间的同相轴发生调谐作用,导致部分溶洞同相轴没有成像或分辨率降低;胡中平等^[9,10]基于正演模拟和实际资料,认为小道距、宽方位观测有益于溶洞储层精确成像;朱生旺等^[11]为提高绕射波成像精度提出了一种适应振幅空变的信号分解算法;董良国等^[12]采用空间网格大小和时间步长均可任意变化的高阶有限差分地震波传播数值模拟方法,研究了溶洞尺度、溶洞填充物对反射振幅和频带的影响;李胜军等^[13]利用波动方程正演模拟技术,分析了溶洞宽度和高度变化对“串珠状”响应特征的影响,为估算溶洞高度和宽度进行了探索性研究;魏建新等^[14]、王立华等^[15]及李凡异等^[16]从不同角

* 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地质楼物探重点实验室 114 室,102249。Email: weijx@cup.edu.cn

本文于 2014 年 12 月 23 日收到,最终修改稿于 2016 年 1 月 26 日收到。

本研究受国家科技重大专项(2011ZX05007-006)资助。

度利用地震物理模型方法研究了不同形态、不同尺度溶洞的地震响应及属性特征,得出以下认识:溶洞绕射能量不仅与溶洞尺度有关,还与溶洞形态有明显的联系,并且溶洞的横向尺度会影响“串珠”状反射的垂向长度,时频分析属性对尺度相近的溶洞具有很好的识别能力;赵群等^[17]利用地震物理模型方法,研究了均匀充填溶洞与非均匀填充溶洞在绕射能量、波形、信噪比以及“串珠”状强短反射长度方面的差异;张军林等^[18]回顾总结了反射波法地震勘探技术在碳酸盐岩勘探过程中所起的作用,并指出地震正演模型技术能定量研究洞穴系统与地震反射之间的比例关系,如何在正演模型研究的基础上,利用储层雕刻等可视化技术对孔洞型碳酸盐储层进行定量研究,是碳酸盐岩洞穴系统研究的一个发展方向;刘群等^[19]在岩溶缝洞体的地震资料分辨率和定量化计算理论依据分析的基础上,通过对“串珠状”反射异常体的雕刻和体积估算,以及由大量数值模拟结果统计获得的体积校正系数的校正,定量计算了有效缝洞体的体积,在塔河油田碳酸盐岩缝洞体体积定量化计算上取得了初步成果;朱仕军等^[20]采用弹性波动方程模拟了不同形态碳酸盐岩溶洞储层模型的地震反射波特征,总结了溶洞在正演偏移剖面上最大波峰振幅与溶洞大小的关系。

上述关于各类孔洞地震响应特征的研究得出了许多有意义的认识,但多数研究是以二维数学模型或三维理论物理模型为基础的。本文根据塔里木

H 工区碳酸盐岩孔洞储层的地质地震资料,对现有地震物理模型制作工艺进行改进,设计和制作一个与实际地层参数相近的三维碳酸盐岩孔洞储层精细物理模型。对照实际地震资料的采集和处理参数对物理模型进行地震数据采集和处理,并以此为基础对实际生产中受关注的热点问题(如孔洞储层的纵向分辨率、横向分辨率以及孔洞储层体积校正等)进行分析。

2 物理模型的构建

物理模型的构建一般分两步:一是模型设计;二是模型制作。在模型设计中,根据研究目的将实际地层参数进行适当的简化,制定物理模型的相似比,得到物理模型的设计图。在模型制作中,依据设计图构建模具,依据地层参数配制模型材料,最终实现物理模型的制作。

通过综合解释(图 1)获知,H 工区碳酸盐岩储层有如下特点:①目的层(特征为:“串珠”状地震反射比较发育)在地震剖面上分布范围为 3900~4200ms,深度约为 6000~7000m;②目的层基岩纵波速度约为 6000m/s;③在目的层上部有几套泥灰岩薄互层,且整体由南向北依次剥蚀尖灭,最北部为志留系覆盖于奥陶系潜山之上;④在目的层上覆薄层中存在比较发育的河道砂体;⑤有一组平面形态为“X”型的高角度大断裂纵向贯穿目的层。

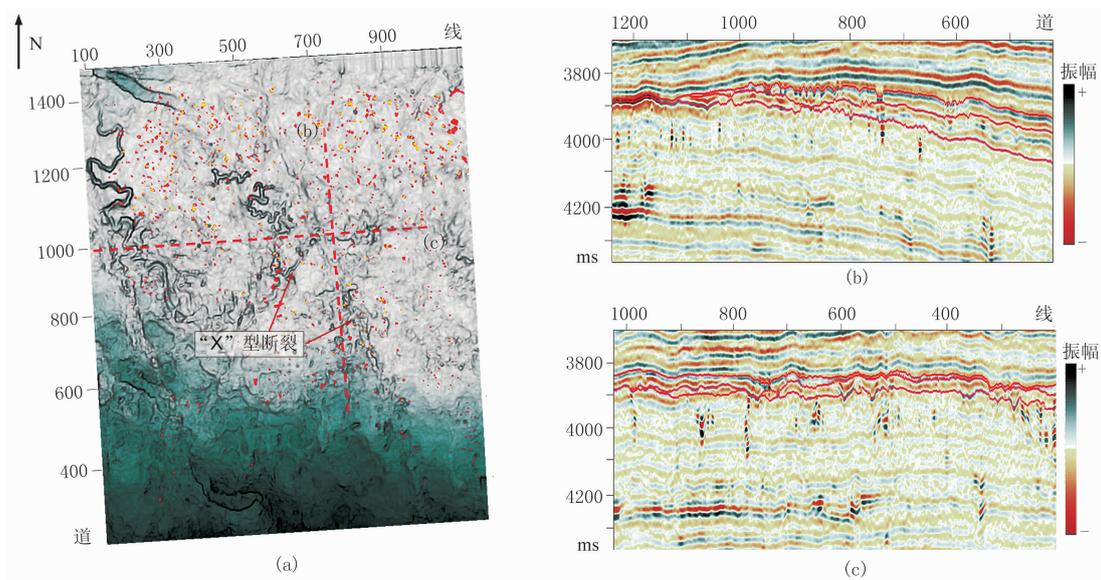


图 1 H 工区碳酸盐岩储层地震资料

(a) 目的层沿层切片; (b) 主测线解释剖面; (c) 联络测线解释剖面

H工区碳酸盐岩孔洞物理模型的构建与以往的物理模型相比,有两大特点:一是目的层埋藏深;二是目标体(孔洞储层)尺度小。结合现有的地震物理模型技术,制定物理模型相似比如下:速度相似比 $v_m:v=1:2$ (带下标为物理模型参数),尺度相似比 $l_m:l=1:20000$,频率相似比 $f_m:f=10000:1$ 。例如:物理模型尺度为1mm,转换后为20m;物理模型材料速度为1480m/s,转换后为2960m/s;超声换能器信号频率为 2.5×10^5 Hz,转换后为25Hz。其余物理模型参数均依此相似比转换后得到。而以往物理模型尺度相似比一般为1:10000或1:5000,因此与常规物理模型相比,此次孔洞物理模型的制作难度更大。采用如此小的相似比,模型中孔洞储集体主要采用等效近似的方法进行设计,即将由孔隙度、孔隙结构、填充物等参数描述的复杂孔缝洞综合储集体等效简化为由等效速度、密度等参数描述的等

效储集体。

图2a为物理模型目的层水平设计图,其中除了储集体的分布外,还显示了河道、断层以及地层尖灭线的水平投影;图2b为物理模型垂向剖面设计图,其中包含了各个界面的接触关系、深度以及地层的纵波速度和密度。在物理模型设计的过程中,将志留系以上地层(含志留系)简化为水平层状,奥陶系按照实际地层产状设计(图2b)。物理模型所模拟的工区横向尺寸为 $20\text{km} \times 17\text{km}$,为了实现目标地质体三维满覆盖,孔洞储集体主要分布在模型中心 $13.58\text{km} \times 12.72\text{km}$ 的范围内。另外,在上覆薄层内设计了一条“Y”型河道,在整个奥陶系地层中设计了一组平面形态为“X”型的高角度大断裂。孔洞储集体分布在深度为6000~7000m的地层中,放置不同类型的孔洞储集体,约200多个储集体规则分布在纵13横14等距线的交叉点上,各储集体的中心间距为1060m(图2a)。

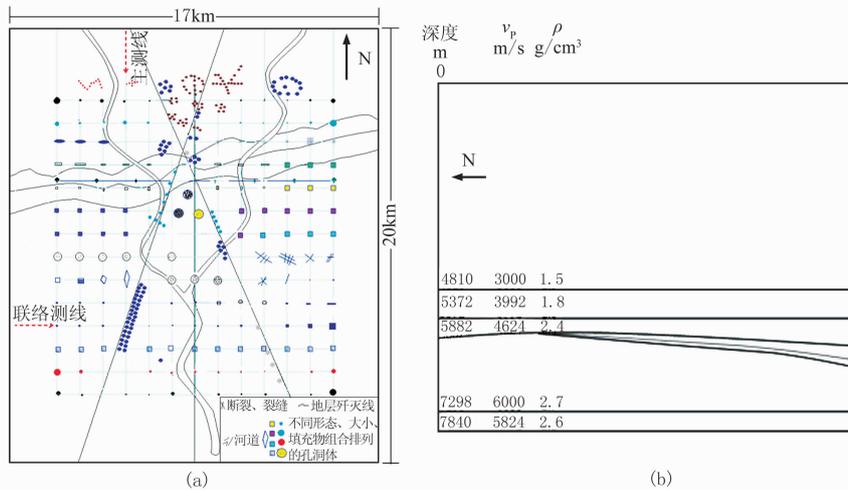


图2 物理模型设计图

(a)目的层水平设计图;(b)垂向剖面设计图

目前物理模型的主流制作工艺为浇注法,主要流程为:根据地层结构设计图制作模具,根据各地层参数配制物理模型浇注材料,然后实现逐层浇注和固化以及针对各地层结构参数的形态测试。孔洞物理模型的制作与常规构造物理模型相比,最大的难点在于孔洞储集体的制作。按照1:20000的尺度比例,物理模型的1mm对应实际的20m,因此孔洞储集体的制作对物理模型制作工艺提出了新的挑战。实验室中的空心玻璃微珠或纤维管,尺度可以满足实验的要求,但是材料本身的弹性参数却不符合要求,所以只能精细加工实验室配比好的模型材料,现有的工艺最小加工尺度精度为0.5mm,相当

于实际情况的10m。为了精确获取单个储集体的尺度和形态参数,此次研究采取了显微镜成像观测和体积换算相结合的方式。其中,利用显微镜对每个储集体形态进行了严格控制,而针对储集体的体积除了量取尺寸计算外,还通过电子秤称取储集体的质量,根据整体材料试块的密度,利用质量和密度计算出储集体的体积,进一步确保了对物理模型孔洞储集体尺度参数的制作精度。

3 物理模型地震资料采集和处理

针对以上制作的物理模型,采取三维观测的方

式,其观测系统依据 H 工区实际三维地震观测系统而设计。具体观测系统参数如下:采集模板为 12 线、30 排炮、120 道(图 3a),测线距为 500m,排炮距为 50m,道距为 50m,最小非纵距为 25m,最大非纵距为 3475m,工区总测线数为 35 条,测线间距为 500m,工区总炮线数为 41 条,炮线间距为 500m,纵向每次滚动 1 炮线,滚动距为 500m,横向每次滚动 3 测线,滚动距为 1500m,面元大小为 25m×25m,覆盖次数为 12(纵向)×6(横向),纵横比为 0.55,采样点数为 3000,采样率为 2ms,地震主频为 25Hz。图 3 为物理模型的三维数据采集模板和覆盖次数示意图。

物理模型地震数据采集主要由三维地震物理模型数据采集系统完成,该系统主要由自动定位装置、模型固定平台(现主要为水槽)、震源和接收器以及信号采集系统等设备组成(图 4)。自动定位装置是

使激发换能器和接收换能器在三维空间任意移动的系统,由两套同样的定位装置组成:一套用于震源的空间定位;另一套用于检波器的定位。每套装置都有三个自由度,允许换能器在 X、Y、Z 三个方向上移动。信号采集系统主要包括脉冲发射器、信号放大器及模数转换器(DAC)等几种仪器。这些仪器全由电脑联接控制,并与自动定位装置配合共同完成地震数据的采集。作为震源和接收器的超声波换能器是数据采集中最主要的器件之一,其性能直接关系到地震资料采集及后续处理解释能否成功。在地震物理模型实验中,宽频带、短余震、高灵敏度、高信噪比及大开角等是高质量超声换能器应具备的性能,地震物理模型中使用的超声换能器需要单独调试和制作。

将制作好的物理模型放入水槽中,按照事先设计好的地震观测系统进行超声物理模型数据采集,

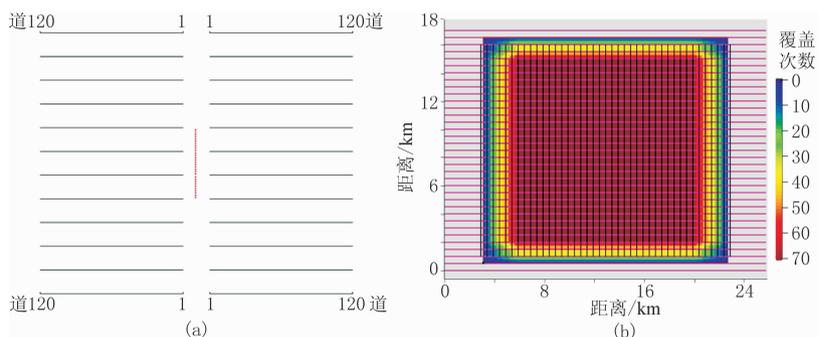


图 3 采集模板(a)和覆盖次数(b)示意图

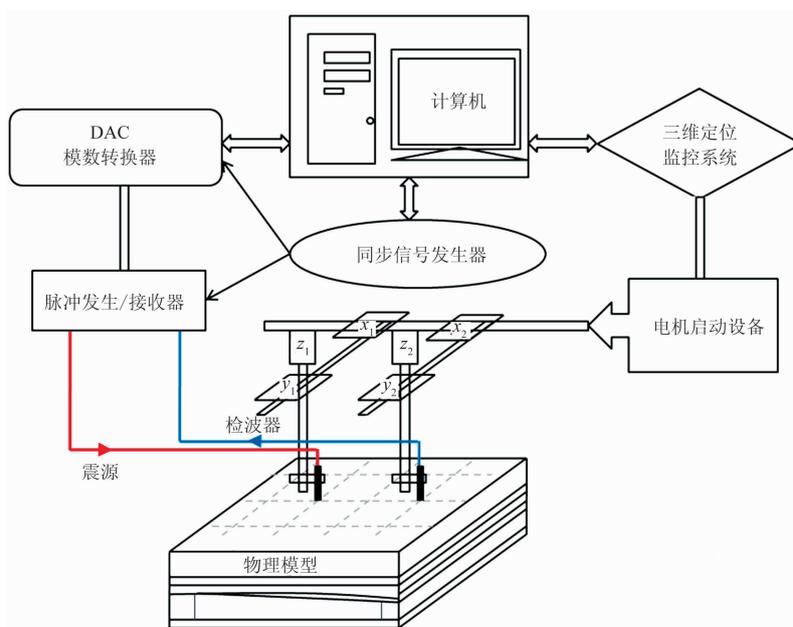


图 4 三维地震物理模型数据采集系统示意图

由于实验采用单发单收测试方式,其采集时间取决于模型大小和观测系统的参数,此次采集用了三个月的时间完成。

物理模型地震数据处理与实际地震数据处理相似,整体上可分为常规处理和成像处理两大块。常规处理中主要包括观测系统编辑和加载、道编辑、真振幅恢复、滤波、多次波压制、反褶积以及采集脚印压制等;而成像处理中主要包括道集准备、初始速度

的拾取和建立,然后针对目标线进行叠前时间偏移,结合 CRP 道集进行偏移速度迭代,得到较准确的 RMS 速度体,进行数据体整体叠前时间偏移。图 5 所示为物理模型地震水平切片和剖面。由图可见,物理模型中设计的孔洞储集体、大断裂以及河道均得到了很好的成像(图 5b 和图 5c 中红色和蓝色箭头分别标注的是河道和大断裂的地震响应),为后续研究提供了较好的数据基础。

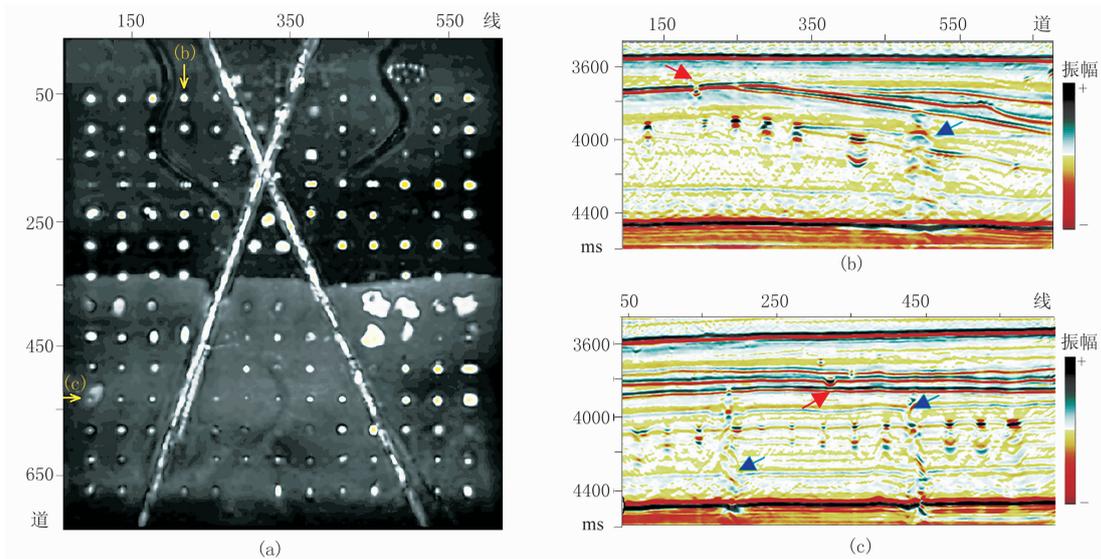


图 5 物理模型地震水平切片和剖面

(a)目的层水平切片;(b)主测线剖面;(c)联络测线剖面

4 物理模型地震资料分析

此次孔洞物理模型中设计了多种类型的孔洞储集体,下面选择一部分模型数据,结合实际生产中比较关心的热点问题(如纵向分辨率、横向分辨率以及孔洞储集体体积校正等)做进一步的分析。

纵向分辨率是指从地震剖面中能够区别一个以上反射界面的能力或者地震资料能够识别薄层的能力。从概念可知,纵向分辨率的核心问题是反射界面的识别,如果界面能够准确识别,那么层的厚度就可以计算出来,但界面识别往往难度较大,因此人们就退而求其次来研究识别薄层的问题(薄层分辨率)^[21]。相应地,在实际生产中除了关心怎样估算孔洞储集体高度外,还需关心垂向多储集体如何分辨的问题。而在薄层地震识别的研究中,地震反演可以从本质上提高其识别能力^[22]。为此,结合物理模型地震资料,讨论波阻抗反演提高孔洞储集体垂

向分辨能力的情况以及该过程中应注意的一些问题。

图 6 为三组多储集体组合对应的地震剖面 and 波阻抗反演剖面。第一组中(图 6a)储集体均为长轴 150m、短轴 40m 的椭球体,最左边两个储集体纵向相距 60m,之间有裂缝,中间的储集体上方有裂缝,最右边的为单储集体。观察其地震剖面,发现两个储集体叠置引起的串珠个数明显多于单个储集体引起的串珠个数,其中裂缝的响应很微弱。从地震剖面上很难直接辨认出垂向储集体的个数;而在波阻抗剖面中,不仅可以反映出储集体低阻抗的性质(此处暖色为低值,冷色为高值),而且还可以直观地看出垂向储集体的个数和相对位置。

第二组中(图 6b)储集体均为直径 60m 的圆球体,每个组合的储集体间距为 40~100m。同样发现,在地震剖面上垂向多个储集体的叠置会导致串珠个数的增加,很难直观地看出储集体的组合方式;而通过波阻抗反演后,储集体的组合方式尤其是纵

向上基本得到了比较真实的反映。

第三组(图 6c)为垂直单储集体和垂直多储集体对比研究。其中储集体宽度均为 80m,形态为圆柱体,垂直单储集体高度为 25~200m。观察地震剖面,高度为 25m 和 50m 的储集体引起的“串珠”相似,此时储集体顶、底反射融合在一起无法辨认;当高度大于等于 100m 时,储集体顶、底反射可以得到清楚的辨认,通过波阻抗反演之后,高于 100m 的储集体只反演出了顶、底反射,顶、底之间的低阻抗信息没有真实地反映出来,而且针对底反射反演出来的低阻抗并非对应底界面,而是相差一个同向轴(在图 6c 中用黄色箭头标注)。再观察垂直多储集体的情况,在 200m 高度内放置了 2~5 个 10m 高的储集体,随着储集体个数增多,地震剖面中“串珠”个数也增多。当储集体个数为 5 时,由于绕射波的相消干涉,串珠能量明显减弱,通过波阻抗反演,储集体在垂

向上的排列方式得到了较真实的反映,即使在 200m 的高度内有 5 个储集体,也可以较好地反演出来。

由以上分析可知,波阻抗反演可以有效提高识别垂向上储集体个数的能力,但对于高度较大的垂直单储集体而言,只能反映出顶、底的存在,中间的阻抗信息将会丢失(这一点与常规的层状储层反演有明显的区别)。这时就需要仔细分析地震剖面中“串珠状”反射的极性。孔洞储集体与围岩相比,一般为低阻抗性质,因此储集体顶形成的串珠极性为负极性(储集体顶界面的反射系数为负),储集体底形成的串珠极性为正极性(储集体底界面的反射系数为正)。例如高度为 200m 的单储集体,纵向上第一个“串珠”极性为负,第二个“串珠”极性为正,即可判断它是一个垂直单储集体;而当在纵向 200m 高度内有两个储集体时,两个串珠的极性均为负,即可判断它为垂直多储集体。

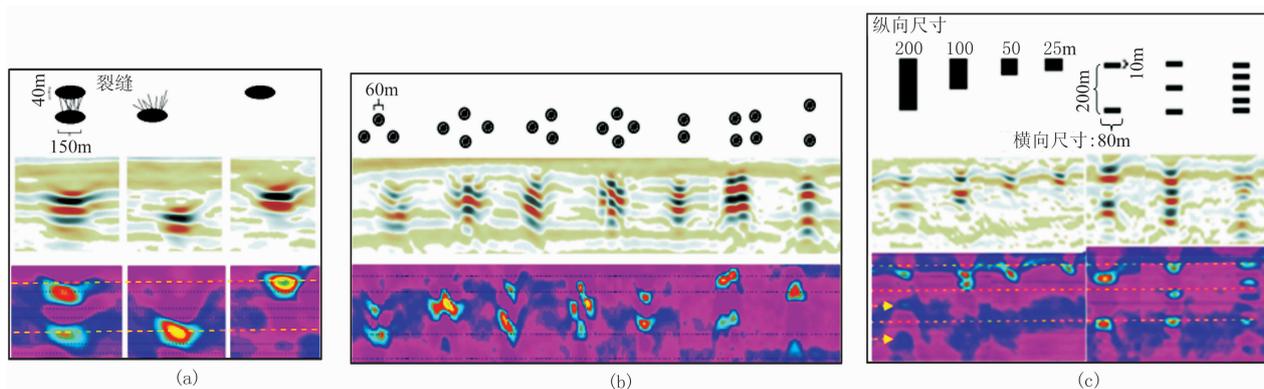


图 6 孔洞储集体垂向分辨特征

(a) 缝洞储集体; (b) 球形洞组合储集体; (c) 垂向单洞和多洞组合储集体

横向分辨率指在水平方向上确认两个地质体间距和地质体大小的能力。关于确认地质体大小的讨论,笔者已在以往的文章中做过一定的论述^[23]。文中主要从物理模型实验的角度讨论确认两个地质体间距的能力,即水平多洞识别的能力。图 7 为一些物理模型和实际资料中水平多洞的切片和剖面。在图 7a 中,孔洞储集体为直径 60m 的球体,左图和右图的洞间中心水平间距分别为 130m 和 150m。由地震切片可以看出:当中心间距为 150m 时,确认两个储集体的存在没有太大争议;而当间距为 130m 时,确认两个储集体的存在就会有争议。因此,在此次模型实验研究中地震水平识别多洞的能力大约在 150m 左右,此外还应考虑实验中储集体本身是有大小的(直径为 60m),假设是两个质点,这个距离将

会有所减小。此处讨论的结果并非严格意义上的推导,但至少可以从实验的角度得出这样的结论:对于类似的地震工区,如果两个储集体水平间距小于 150m,很有可能是无法区分的。换言之,在 150m 的范围内是单洞还是多洞存在多解性。另外,通过观察实际地震剖面(图 7b)发现,孔洞储集体之间往往高低不齐,水平方向上地震相位会发生变化,这种普遍存在的现象可以在一定程度上改善地震资料识别水平多洞的能力。

下面讨论孔洞储集体体积校正的问题。由于反射地震观测方式的特殊性,导致利用地震数据计算地质体纵向和横向尺度的原理和方法不同,因此,确定地质体体积通常是先分别估算其横向和纵向尺度,然后换算成体积。同样,计算地下孔洞储集体轮

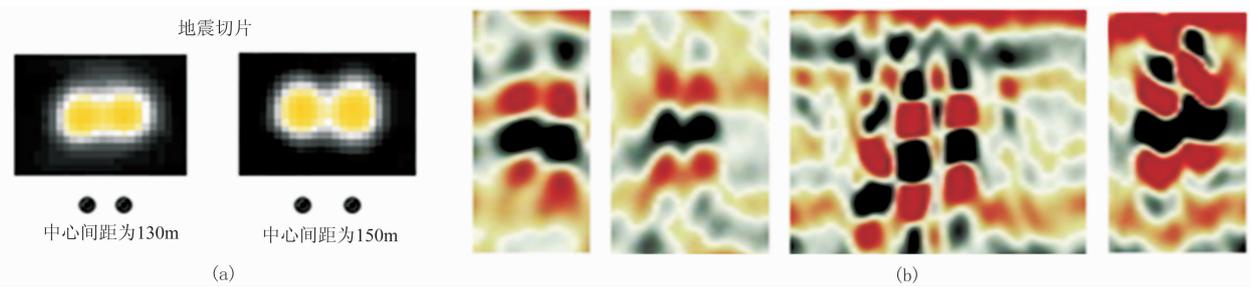


图7 水平多洞地震响应

(a)水平双洞物理模型地震切片;(b)实际数据地震剖面

廓体积的最准确方法也应该是先估算其高度和宽度,然后计算体积。但是,由于地震分辨率和孔洞储集体尺度的双重限制,估算孔洞储集体宽度(主要受横向分辨率的制约)和高度(高度较小时洞顶、底反射不易区分)存在一定的难度,因此在实际生产中探索出一种孔洞储集体三维雕刻估算储集体轮廓体积的方法^[24,25],即三维雕刻估算孔洞储集体体积的方法。

该方法的总体思路是:针对地震成像数据体(或者属性体),设定阈值进行三维雕刻,保留孔洞储集体的地震信息,然后在深度域将地震三维雕刻体积转换为地质体体积。整个过程中孔洞储集体的地震三维雕刻体积和真实体积之间的关系是至关重要的研究内容,利用二者的关系,就可以通过孔洞储集体地震三维雕刻体积计算出地下孔洞储集体的真实体积。从理论上讲,这种关系的建立可以由两种方法得到:一是通过测井和油气开发数据估算出孔洞储集体的体积,然后建立与地震响应的统计关系;二是通过地震正演,模拟大量孔洞储集体的地震响应,利用统计的方法建立孔洞储集体地震雕刻体积和孔洞储集体真实体积的关系。然而,在实际中,通过测井和开发数据很难获得孔洞储集体的真实体积,因此大大制约了第一种方法的使用;针对第二种方法,则可以通过三维地震物理模型技术很好地完成^[26,27]。

在获得可靠的物理模型地震成像数据的基础上,首先通过进一步的解释性处理,使物理模型和实际地震数据在频谱、目的层能量等方面保持一致,以确保孔洞体雕刻时两套数据能够采用统一的雕刻阈值;然后针对两套地震数据进行属性提取,将成像体中每个储集体的“串珠”状反射特征转换为一个空间上的连续体,分析雕刻体积和真实体积的关系获得体积校正量板;最后,利用校正量板对实际孔洞体

积进行估算。

纵波阻抗体属性可以将储集体的“串珠”状反射特征转换为一个空间上的连续体,并且可有效提高纵向分辨率,因此本文选用纵波阻抗体属性雕刻孔洞储集体。通过统计和分析雕刻体积和真实体积的关系得到校正量板,图8为由物理模型得出的孔洞储集体体积校正量板,横坐标为物理模型中孔洞储集体的真实体积,纵坐标为物理模型孔洞体的纵波阻抗体雕刻体积。在此次物理模型研究中,孔洞储集体的等效纵波速度范围为2500~3200m/s,用来模拟不同孔隙度、不同流体的孔洞储集体的等效速度,其形态主要为圆柱体和球体。填充物性质和形态这两个特征参数是通过实际资料统计并简化后得出的,正是这两个参数的变化导致了校正量板中散点的发散特征,对散点进行关系拟合后可近似得出体积校正曲线。

图9为实际地震资料两种地震属性的孔洞体三维雕刻图。通过两种地震属性的对比可以明显看出,在实际地震资料中纵波阻抗体属性对孔洞体的刻画同样有着独特的优势,由于其高分辨率的特征,纵波阻抗体雕刻体积明显比常规地震属性雕刻体积小得多,更接近真实值,利于孔洞体的准确描述。结合物理模型得到的体积校正量板(图8)以及三维

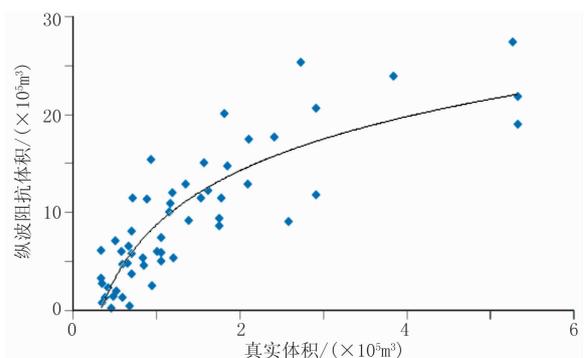


图8 由物理模型地震数据得出的孔洞储集体体积校正量板

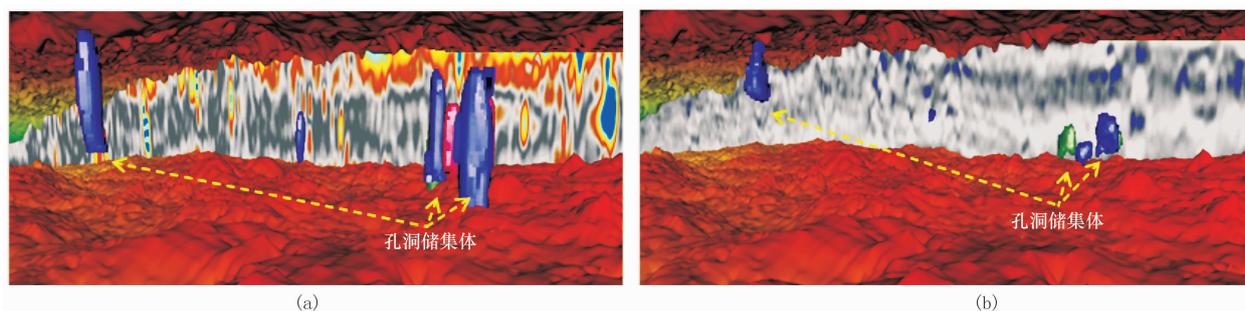


图 9 实际孔洞储集体三维雕刻图

(a)瞬时振幅属性; (b)纵波阻抗属性

雕刻结果(图 9),对实际孔洞储集体的体积进行估算,在实际生产中取得了很好的应用效果。

5 结论

根据实际地质地震资料,对现有地震物理模型制作工艺进行改进,成功构建了一个满足实际生产需求的碳酸盐岩孔洞型储层精细物理模型;依据实际地震资料的采集处理参数对地震模型进行了数据的采集和处理,得到与实际地震数据相匹配的物理模型地震数据体;并以此为基础,对孔洞储层的一些热点问题进行了讨论,得到以下几点认识:

(1)波阻抗反演可以有效提高纵向储集体的识别能力,但同时要参考地震剖面分析“串珠”的反射极性,以避免由单个较大的储集体造成的假象,从而错过大型储集体;

(2)从地震物理模拟实验的角度得出塔里木 H 工区横向识别多洞的最小距离为 150m,孔洞储集体之间的深度差异可以在一定程度上改善地震资料识别水平多洞的能力;

(3)纵波阻抗属性可以将储集体的“串珠”状反射特征转换为一个空间上的连续体,并且可有效提高纵向分辨率,利用此属性及地震物理模型数据可以有效建立孔洞储集体校正量板,实现实际孔洞储集体体积的估算。

参 考 文 献

- [1] 周新源,杨海军,韩剑发等. 中国海相油气田勘探实例之十二——塔里木盆地轮南奥陶系油气田的勘探与发现. 海相油气地质, 2009, 14(4): 67-77.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Han Jianfa et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 12): Lunnan Ordovician oil-gas field in Tarim basin. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 67-77.
- [2] 韩剑发,梅廉夫,潘文庆等. 复杂碳酸盐岩油气藏建模及储量计算方法——以潜山油气储量计算为例. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(2): 267-278.
Han Jianfa, Mei Lianfu, Pan Wenqing et al. Complex carbonate hydrocarbon reservoir modeling and reserve calculating: Taking the buried carbonate hill oil-gas pool reserve calculation as an example. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(2): 267-278.
- [3] 姚姚,唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 623-629.
Yao Yao, Tang Wenbang. Theoretical study of detectable cavern-fractured reservoir in weathered Karst of deep carbonatite. OGP, 2003, 38(6): 623-629.
- [4] 姚姚. 菲涅尔带与洞缝型油气藏地震波场. 石油物探, 2005, 44(5): 491-494.
Yao Yao. Fresnel zone and seismic wave field in the fracture-vug reservoir. GPP, 2005, 44(5): 491-494.
- [5] 吴俊峰,姚姚,撒利明. 碳酸盐岩特殊孔洞型构造地震响应特征分析. 石油地球物理勘探, 2007, 42(2): 180-185.
Wu Junfeng, Yao Yao, Sa Liming. Analysis on seismic response of special cavernous structure of carbonate. OGP, 2007, 42(2): 180-185.
- [6] 闵小刚,顾汉明,朱定. 塔河油田孔洞模型的波动方程正演模拟. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 187-191.
Min Xiaogang, Gu Hanming, Zhu Ding. Wave equation forward modeling of cavern models in Tahe oil-field. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 187-191.
- [7] 郑四连,贺振华,黄德济. 含溶洞介质地震记录正演. 物探化探计算技术, 2004, 26(2): 114-117.
Zheng Silian, He Zhenhua, Hang Deji. Seismic wavefiled numerical simulation of fractured reservoir. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 26(2): 114-117.
- [8] 吴永国,贺振华,黄德济. 串珠状溶洞模型介质波动方程正演与偏移. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 539-544.
Wu Yongguo, He Zhenhua, Huang Deji. Wave equation forward modeling and migration for beads-shaped corroded cave model. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 539-544.
- [9] 胡中平. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法. 中国西部油气地质, 2006, 2(4): 423-426.

- Hu Zhongping. Mechanism and distinction method for the seismic "string beads" characteristic. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(4):423-426.
- [10] 胡中平,李宗杰,赵群. 碳酸盐岩溶洞发育区高精度地震勘探效果. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1):83-87.
Hu Zhongping, Li Zongjie, Zhao Qun. High-precision seismic exploration in carbonate Karst cave developed area. OGP, 2008, 43(1):83-87.
- [11] 朱生旺,曲寿利,魏修成等. 通过压制共散射点道集映射噪声改善绕射波成像分辨率. 石油物探, 2010, 49(2):107-114.
Zhu Shengwang, Qu Shouli, Wei Xiucheng et al. To improve imaging resolution by mapping noise attenuation on CSP gathers. GPP, 2010, 49(2):107-114.
- [12] 董良国,黄超,刘玉柱等. 溶洞地震反射波特征数值模拟研究. 石油物探, 2010, 49(2):121-124.
Dong Liangguo, Huang Chao, Liu Yuzhu et al. Numerical simulation of seismic wave propagation in cave carbonate reservoir. GPP, 2010, 49(2):121-124.
- [13] 李胜军,刘伟方,高建虎. 正演模拟技术在碳酸盐岩溶洞响应特征研究中的应用. 岩性油气藏, 2011, 23(4):106-109.
Li Shengjun, Liu Weifang, Gao Jianhu. Application of forward modeling to research of carbonate cave response. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4):106-109.
- [14] 魏建新,狄帮让,王立华. 孔洞储层地震物理模拟研究. 石油物探, 2008, 47(2):156-160.
Wei Jianxin, Di Bangrang, Wang Lihua. Seismic physical modeling for cavern reservoir. GPP, 2008, 47(2):156-160.
- [15] 王立华,魏建新,狄帮让. 溶洞物理模型地震响应及其属性分析. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3):291-296.
Wang Lihua, Wei Jianxin, Di Bangrang. Seismic response of Karst cave physical model and analysis of its attributes. OGP, 2008, 43(3):291-296.
- [16] 李凡异,魏建新,狄帮让. 碳酸盐岩溶洞横向尺度变化的地震响应正演模拟. 石油物探, 2009, 48(6):557-562.
Li Fanyu, Wei Jianxin, Di Bangrang. Forward simulation of seismic response in carbonate caverns with varied lateral scale. GPP, 2009, 48(6):557-562.
- [17] 赵群,曲寿利,薛诗桂等. 碳酸盐岩溶洞物理模型地震响应特征研究. 石油物探, 2010, 49(7):351-358.
Zhao Qun, Qu Shouli, Xue Shigui et al. Study on the seismic response characteristics on the physical model of carbonate cave. GPP, 2010, 49(7):351-358.
- [18] 张军林,田世澄. 缝洞型碳酸盐岩储层反射波法地震勘探技术的现状与趋势. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(12):62-66.
Zhang Junlin, Tian Shicheng. Current situation and trend of seismic exploration technique of reflection wave method of fracture-vuggy carbonatite reservoirs. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(12):62-66.
- [19] 刘群,王世星,顾汉明等. 碳酸盐岩缝洞体体积定量计算及其影响因素分析探索. 石油物探, 2013, 52(2):217-222.
Liu Qun, Wang Shixing, Gu Hanming et al. Carbonate fracture-cave volume quantitative calculation and its influencing factors analysis; case study of the main area in Tahe Oilfield. GPP, 2013, 52(2):217-222.
- [20] 朱仕军,唐绪磊,朱鹏宇等. 碳酸盐岩缝洞储层地震反射波特征及其与油气的关系. 天然气工业, 2014, 34(4):57-61.
Zhu Shijun, Tang Xulei, Zhu Pengyu et al. Reflection characteristics of seismic waves of carbonate cave reservoirs and their significance to the oil and gas discovery. Natural Gas Industry, 2014, 34(4):57-61.
- [21] Zeng H L. How thin is a thin bed? An alternative perspective. The Leading Edge, 2009, 28(10):1192-1197.
- [22] 黄捍东,赵迪,任敦占等. 基于贝叶斯理论的薄层反演方法. 石油地球物理勘探, 2011, 46(6):919-924.
Huang Handong, Zhao Di, Ren Dunzhan et al. A thin bed inversion method based on Bayes theory. OGP, 2011, 46(6):919-924.
- [23] 李凡异,狄帮让,魏建新等. 碳酸盐岩缝洞体宽度估算方法. 地球物理学报, 2012, 55(2):631-636.
Li Fanyu, Di Bangrang, Wei Jianxin et al. A method for estimating the width of carbonate fracture-cavern bodies. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):631-636.
- [24] 赵裕辉,胡建中,鲁新便等. 碳酸盐岩缝洞型储集体识别与体积估算. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5):720-724.
Zhao Yuhui, Hu Jianzhong, Lu Xinbian et al. Identification of carbonate fractured-vuggy reservoir and volume estimation. OGP, 2010, 45(5):720-724.
- [25] 刘学利,鲁新便. 塔河油田缝洞储集体储集空间计算方法. 新疆石油地质, 2010, 31(6):593-595.
Liu Xueli, Lu Xinbian. Volume calculation method for fracture-cavity reservoir body in Tahe oilfield, Tarim basin. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6):593-595.
- [26] 李凡异,狄帮让,魏建新等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3):385-391.
Li Fanyu, Di Bangrang, Wei Jianxin et al. Formation mechanism research for bead-like seismic reflection of carbonate caves. OGP, 2012, 47(3):385-391.
- [27] Li Fanyu, Di Bangrang, Wei Jianxin et al. Volume estimation of the carbonate fracture-cavern reservoir; A physical model study. Expanded Abstracts of EAGE Annual Meeting, 2012, 1178-1181.

(本文编辑:刘英)

作者简介



李凡异 工程师,博士,1984年生; 2007年毕业于中国石油大学(北京)物探专业,获理学学士学位;2012年毕业于中国石油大学(北京)地质资源和地质工程专业,获博士学位;现在中海油研究总院从事油气勘探方面的研究工作。