

复杂介质地震波场 模拟分析与应用

张永刚 等编著

石油工业出版社

复杂介质地震波场 模拟分析与应用

张永刚 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是中国石油化工股份有限公司重点科技项目成果总结。它围绕中国石化探区复杂地质条件下的勘探开发问题,通过深入细致的岩石物性测试分析,建立了更符合油田实际的岩石物理模型和岩性、流体识别量版;在对复杂构造波场物理和数值模拟的基础上,探索了高陡构造及玄武岩覆盖下的地震波传播规律,提出了面向目标的地震采集设计思路,以及利用广角信息的深层成像技术;通过对缝洞储集体地震响应的正演分析,建立了缝洞地震响应模式及其与缝洞尺度之间的量化关系,为缝洞储层的精细描述提供了理论依据。书中成果对于我国东部隐蔽油气藏的勘探开发及油田动态管理,对于南方高速屏蔽层下的深层油气勘探,对于复杂地表与复杂地下构造条件下的地震资料采集,对于我国西部及南方非均质碳酸盐岩储集体的有效勘探开发,具有重要的推广应用价值。该书的出版将有力地促进适合中国油气地质特点的勘探方法技术的发展与创新。

本书从高陡构造、玄武岩与膏盐岩、岩性油气藏和碳酸盐岩孔缝洞储集体等方面,详细介绍了针对不同复杂介质开展的地震模拟研究工作、获得的资料、分析认识及应用效果。同时,针对目前地震勘探技术的不足,提出了下一步探索研究的目标。

本书可供从事地球物理研究的技术人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂介质地震波场模拟分析与应用/张永刚等编著.

北京:石油工业出版社,2007.3

ISBN 978-7-5021-5953-5

I. 复…

II. 张…

III. 地震波-地震模拟试验-研究

IV. P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 027439 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.5

字数:422 千字 印数:1—1000 册

定价:128.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《复杂介质地震波场模拟分析与应用》

编 委 会

主 任：张永刚

委 员：许卫平 管路平 郭 建 朱成宏 马中高
赵 群 余德平 胡中平 周 巍 孙开峰
陈本池 杨勤勇

前 言

随着勘探对象日趋复杂,以及勘探技术向开发不断延伸,现有地球物理技术手段已越来越难以满足解决实际问题的需要,迫切需要引入新理论、发展新技术。近年来,国内外各大石油公司都在纷纷联合大学与科研院所开展地球物理基础研究,站在新技术的高度,审视勘探面临的新问题,探索新技术的发展前景。复杂介质中的地震波传播规律研究是共同关注的热点之一。

随着由大型构造油气藏的勘探向隐蔽油气藏特别是岩性油气藏勘探的转变,油气勘探的难度也越来越大,迫切需要有新的勘探技术手段和发展与岩性勘探有关的新技术。在勘探地震学中,地震波以旅行时间、反射波振幅及相位变化的形式带来了地下岩石和流体的信息,这些地震特性受到诸如压力、温度、饱和度、流体类型、孔隙度、孔隙类型等诸多因素的复杂影响。随着地震处理、解释技术的进步和计算能力的提高,现在对地震数据的分析已经从单纯的构造解释发展到要求能够预测岩性、孔隙度和孔隙流体等储层参数,为油藏描述和储量计算提供基础数据。

目前,我们采用的绝大多数地震勘探技术都是基于水平层状均匀介质的假设,基于这种假设的地震方法技术在地质条件不很复杂的构造勘探中是有效的。然而,目前我们面临的勘探对象是越来越复杂的地质体,勘探的任务已扩展到岩性勘探领域。针对复杂构造和岩性圈闭,常规的方法和思路已难以奏效,我们需要寻找更为有效的解决方案。

新方法、新技术的发展需要理论的支持,基础理论研究工作方法是方法技术更新发展的基础。岩石物理学许多理论与实验结果极大地推动了地震岩性识别,如亮点(暗点)技术,AVO、DHI,4D地震和注采监测等新技术的发展。墨西哥湾盐丘体地震波传播规律的认识,揭示了常规水平叠加技术成像效果差的原因,促进了盐下成像叠前深度偏移技术的发展。针对愈来愈复杂的地质条件,我们必须加强应用基础理论的研究,建立新的理论体系,这样才能取得复杂介质油气勘探开发技术的突破。

本书针对我国油田现今油气勘探开发中地质条件复杂的实际问题,从岩心测试和多种复杂介质模型建立等基础工作着手,深入细致地开展岩石物性参数分析和正演模拟分析等基础理论研究,建立比较逼近实际的岩石物理模型,探索和认识复杂介质中地震波的传播规律,使复杂地区的地震勘探工作建立在切实可靠的地震波传播理论基础之上,为野外地震数据采集提供指导,为地震数据处理提供理论依据,指导地震资料解释,验证解释结果,促进适合不同油气地质特点的勘探技术的发展和创断。

本书围绕研究目标,开展了大量的研究工作:

(1)通过对济阳拗陷大量岩心全面系统的测试和分析,总结了岩石物性变化规律,完善和发展了适合于中国东部石油地质条件的岩石物理模型,形成岩石物理指导下的地震储层预测技术,为胜利油田隐蔽性油气藏的勘探开发提供了可靠的基础依据和技术支持。

(2)通过大量的缝洞模型正演模拟和分析,建立了缝洞地震响应模式,发展了缝洞储层的量化分析技术,及时将研究成果应用于塔河油田碳酸盐岩储层预测,准确地预测了缝洞体,提高了钻井成功率,取得了显著的经济效益。

(3) 通过大量的正演模拟计算和分析,揭示了高速玄武岩覆盖地质条件下地震波传播规律,探索出压制多次波和提高深层构造成像的有效方法,取得了江汉油田玄武岩下深层构造成像的突破。

(4) 开发了基于波动方程的照明分析技术,进一步发展了高陡构造条件下采集设计优化分析技术,通过高陡构造模型正演模拟和资料处理分析,提出了改善复杂构造成像质量的新思路。

(5) 构建了一套特色鲜明的应用地球物理基础理论研究创新体系。

从岩石物理测试分析入手,到高精度全波场数值正演、大尺度高仿真物理模型观测、地震波传播规律分析与数据处理、波场特征认识指导下的野外采集设计试验,通过各层次的技术创新将实际生产应用与基础理论研究连成一个整体。在新技术条件下实现了“以理论指导实践,用实践检验理论”的技术创新体系,使我国应用地球物理基础理论研究上升到了一个更高的水平。

目 录

第一章 碎屑岩岩石物理测试分析.....	(1)
第一节 岩石物理参数测试.....	(1)
第二节 岩石物理参数分析.....	(9)
第三节 沉积特征对岩石弹性参数的影响	(38)
第四节 岩石物理模型建立	(45)
第五节 岩性划分量和孔隙流体识别	(55)
第六节 岩石物理模型的地震模拟与弹性参数反演	(61)
第七节 岩石物理分析软件开发	(77)
第二章 碳酸盐岩岩石物理测试分析.....	(106)
第一节 样品采集、制作.....	(106)
第二节 实验测试仪器.....	(107)
第三节 岩石及流体样品实验测试.....	(110)
第四节 岩石物理实验规律分析.....	(114)
第三章 玄武岩与膏盐覆盖区地震波场模拟.....	(129)
第一节 玄武岩覆盖区地质地球物理特征.....	(129)
第二节 玄武岩覆盖区数值模拟研究.....	(131)
第三节 江陵凹陷玄武岩三维物理模型实验研究.....	(138)
第四节 玄武岩覆盖区广角地震研究.....	(145)
第五节 胜利油田膏盐岩下构造数值模拟研究.....	(153)
第六节 胜利油田膏盐岩下构造物理模型实验研究.....	(168)
第四章 孔缝洞储集体地震波场模拟分析.....	(174)
第一节 裂缝物理模型实验研究.....	(174)
第二节 裂缝数值模拟研究.....	(182)
第三节 溶洞物理模型实验研究.....	(187)
第四节 溶洞数值模拟研究.....	(197)
第五章 高陡构造地震波场模拟分析.....	(207)
第一节 高陡构造发育区地质地球物理特征.....	(207)
第二节 高陡构造物理模型实验研究.....	(208)
第三节 高陡构造数值模拟研究.....	(227)
第六章 复杂介质地震波场模拟分析与应用.....	(235)
第一节 岩石物理分析在储层预测中的应用.....	(235)
第二节 玄武岩覆盖区深部构造成像实践.....	(244)
第三节 塔河油田缝洞储层预测应用.....	(248)
参考文献.....	(256)

第一章 碎屑岩岩石物理测试分析

自 1962 年获工业油流, 历经 30 多年的勘探和开发, 济阳拗陷业已进入较高程度勘探开发阶段, 大型构造油藏的发现率大幅度下降, 各种类型的隐蔽性油藏在年探明石油地质储量中的比例大幅度上升, 因此寻找优质砂岩隐蔽油藏成为最为急迫的任务。隐蔽油气藏平均埋深大、低渗透比例高、储量丰度低, 传统的勘探方法难以发现这类油藏。主要是因为我们对储层岩性变化的地震波场特征认识不充分, 更重要的是对岩性储层的物理性质变化规律了解不够。济阳拗陷岩性油气藏特点可概括如下:

- (1) 油藏埋深达 3500m, 单个砂体的厚度较薄 (5~20m), 常规地震剖面难以识别;
- (2) 砂泥岩地层的纵波速度差异小, 常规的地质—地球物理方法识别困难;
- (3) 储层含油性横向变化大, 预测难度大。

精确的储层描述和含油性预测成为岩性勘探能否取得成功的关键因素之一。

目前, 储层精细描述和含油性预测的主要手段是地震技术, 因为地震波波场特征蕴涵着地下岩石和流体的信息。这些地震特征受诸如埋藏深度 (压力)、温度、孔隙度、孔隙类型、流体饱和度、流体类型、泥质含量, 以及地层沉积环境等诸多因素的影响。把握储层参数特征变化及其地震响应就可以准确地预测岩性、孔隙度和孔隙流体, 实现油藏描述和储量计算。

我们首先对岩石性质进行实验测量, 研究分析了解岩性储层的物性参数变化规律, 建立符合实际的更为客观的岩石物理学模型, 然后进行地震波场正演模拟, 分析认识储层参数变化及复杂条件下的地震波传播规律, 为利用地震资料发现与描述砂岩隐蔽油气藏提供科学的实验依据和技术基础, 为岩性储层预测及含油气识别提供有效的地球物理手段。

第一节 岩石物理参数测试

一、样品采集

进行取样井和取样层段的总体原则是, 全面考虑济阳拗陷不同层系 (深度)、不同类型隐蔽油气藏, 围绕隐蔽油气藏勘探的需要, 确定采集样品的位置, 样品数量原则上为 500 块。根据岩心实际情况, 在 64 口钻井岩心中共取样 573 块 (实测 538 块), 采集样品井的分布情况见图 1-1-1, 比原设计取 500 块样品超额 73 块。取样主要以东营凹陷为主, 兼顾沾化凹陷、惠民凹陷和车镇凹陷。除考虑凹陷因素外, 还考虑了取样井在陡坡带、缓坡带、洼陷带等不同构造带的分布, 此外还在深井取样。对碎屑岩取样分别考虑了不同粒级砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等。并注意采集各种过渡岩性样品。另外, 还对各种火成岩、生物灰岩、膏盐岩等特殊岩性进行了取样, 获取共计 70 块特殊岩性 (包括部分深层) 的样品。

岩样平面分布情况统计如表 1-1-1, 样品的孔隙度分布为 2%~27%。

从岩石样品的资料来看, 各种岩石类型的数量分布情况是:

泥 (页) 岩, 156 块; 砂 (砾) 岩, 344 块; 其中粉砂岩 136 块, 细砂岩 57 块, 砂岩 61 块, 砾岩 90 块; 岩盐, 2 块; 生物灰岩, 16 块; 白云岩, 4 块; 火成岩 38 块。

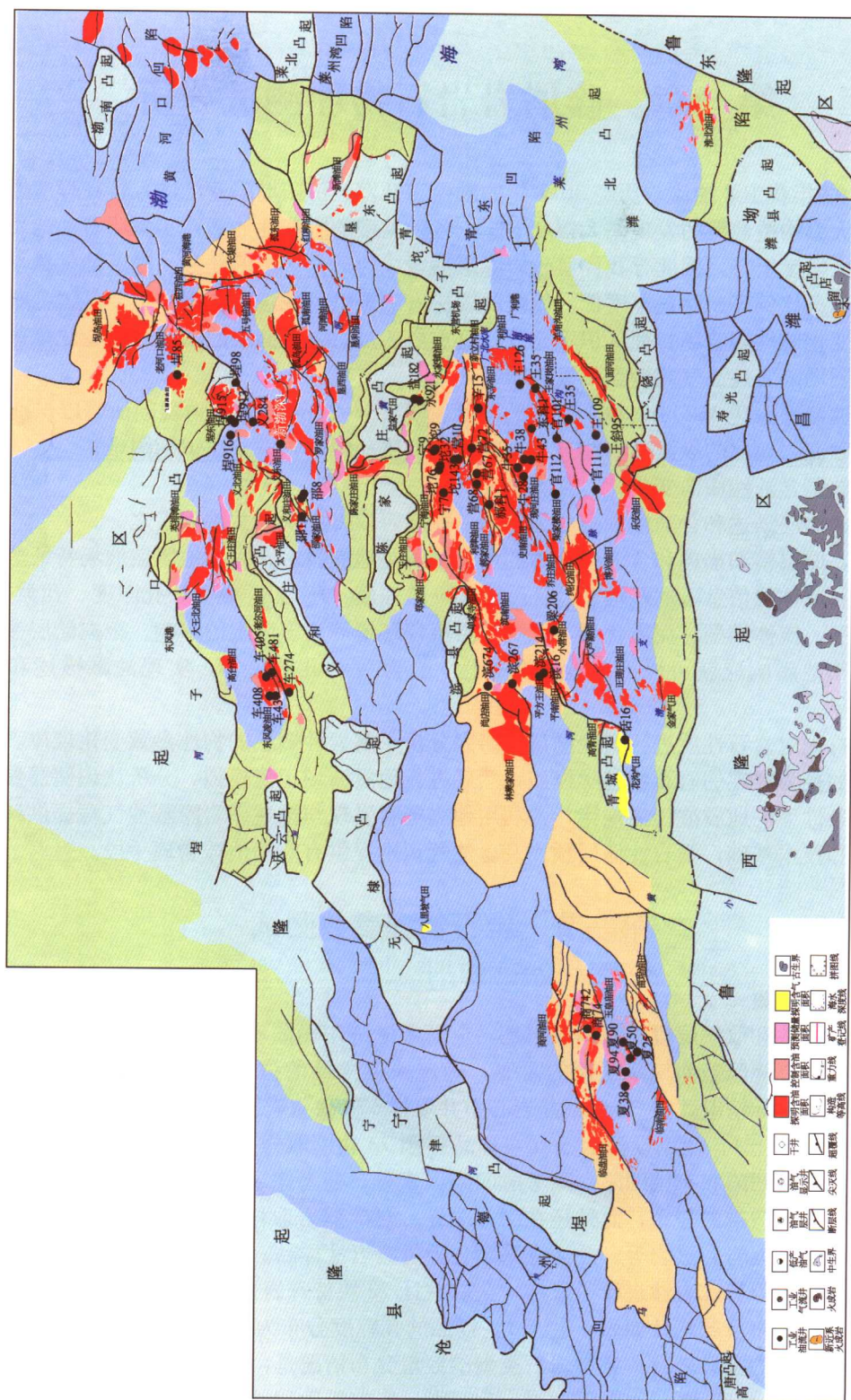


图1-1-1 胜利油田采集岩心样品平面分布图

表 1-1-1 岩样分布情况

样品按凹陷分布统计			
东营凹陷	沾化凹陷	惠民凹陷	车镇凹陷
418 块	51 块	54 块	48 块
样品按沉积相带分布统计			
陡坡带	缓坡带	洼陷带	深层
248 块	82 块	216 块	25 块

此外还收集了流体样品 21 个，其中原油样品 8 个；根据油田提供的资料，配置了 13 种流体样品，包括纯水样，矿化度为 3%，10%，22% 的水样；用甲烷气合成的含溶解气水样（矿化度 22%）；利用其中的 7 个原油样合成了 8 个含溶解气的油样，其气油比（GOR）分布范围为 10~50，基本和胜利油田油藏的气油比参数分布范围一致。

二、实验测试仪器与工作方式

1. 高温高压岩石物性测量设备

高温高压岩石物性测量设备的基本组成如图 1-1-2。

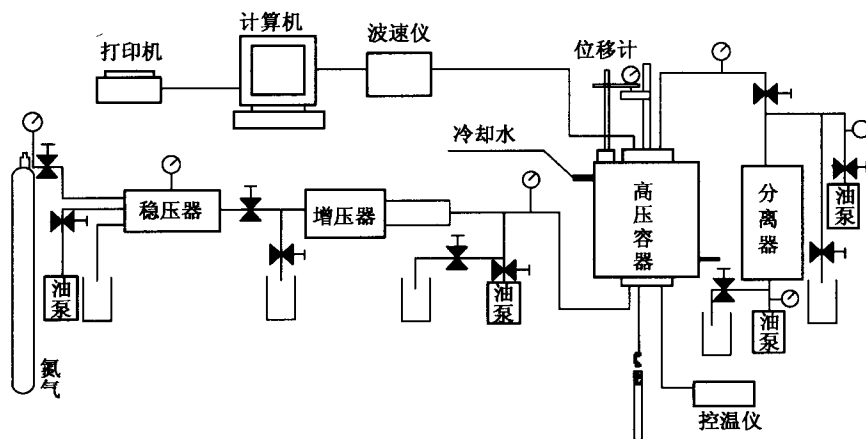


图 1-1-2 高温高压岩石波速测定仪器的基本组成

压力控制方式：压力控制包括围压控制和孔隙压力控制。围压用来模拟上覆地层重量引起的压力；孔隙压力模拟地层流体的压力。压力测定表为 0.4 级的精密压力表，分辨率为 0.1MPa。孔隙压力通过流体从岩样一端加入，在岩样的另一端同时观察，以确保孔隙压力在岩石样品内部达到平衡。

温度控制方式：采用高压容器内加热方式，加热过程中采用热电偶进行监测，热电偶直接插入高压容器里测量围压流体的温度，并输出信号给温度控制仪，控制加热的功率，达到自动温度控制。温度控制精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

流体注入与计量方式：实验中可根据需要，把有关的流体注入岩石样品中。注入方式是把要注入的流体放在分离器的前半部，与岩石样品的一个端面连通；分离器的另一半为传压液体（为纯净水），与一压力泵相连；中间为一隔离活塞，通过液压泵，产生压力，推动活塞，把分离器前端的液体注入岩石样品中。向岩样注入流体（原油或盐水），相当于改变岩

石中某一流体相的饱和度。流体从岩样一端注入，从另一端流出。在岩石完全充满流体的情况下，流体的注入量用流体排出量计量，并以此计算岩样中某相流体的饱和度。如对饱油的样品注水，注入水量用驱排出的原油量计算。排出流体的计量使用计量管，精度为 $\pm 0.05\text{ml}$ 。

岩样密封：置于高压容器中的岩石样品由一个耐高温的橡胶套封包起来，与围压液体隔离。岩样两端为专门的堵块，内含有声波传感器并有孔道与外相通。

岩石纵、横波速度测定方式：超声脉冲透射法测量系统包括纵、横波声波传感器、方波脉冲发生接收器、数字储存示波器和计算机。

声波传感器放置在样品两端，声波传感器连接方波脉冲发生接收器，方波脉冲发生接收器再与数字储存示波器相连，后者与计算机连接，由此构成一个完整的声波参数测定和分析系统。

方波脉冲发生接收器为泛美公司产品，型号为 5077PR，用于产生电脉冲激发声波传感器产生超声波，同时接收从另一个传感器传来的接收信号，并把它放大，最后送给数值储存示波器显示和储存。

数值存储示波器为 Tektronix 公司产品，型号为 TDS210，其最快的采集率为 1G/s ，AD 为 8bit，通过 RS233 串口和微机相连，实际采用的数据采集速率为 50m/s ，采集数据的时间分辨率为 $0.02\mu\text{s}$ 。

声波速度测定是在控制的温度、压力和流体饱和度状态下原位进行的。典型的实验过程是：先把岩样用流体饱和，然后密封好放到高压容器中，先加少量的围压，如 5MPa ，再通过孔隙流体通道向岩样注入流体，控制孔隙压力比围压小，比如 3MPa 。同时增加围压和孔隙压力到预定的数值，然后对岩样加热到储层状态，加热过程保持围压和孔隙压力不变，当温度、孔隙压力都达到预定值后，即可进行声波速度测量，同时测量位移杆的变动，计算岩样长度变化。然后再按研究目的，分别改变孔隙压力、温度或流体饱和度，让一个参量（如含油饱和度）变化，而其他参量保持不变，在新的控制状态下测量岩心声波速度。通过对岩样地震参数进行系列的实验测定，从而确定了这些因素对岩石物理性质的影响效应。

岩石衰减参数测定方式：岩石衰减是指声波在岩石中传播时发生能量损耗，振幅随传播距离减小的物理现象。衰减参数可以用衰减系数或品质因子表述。

衰减系数 α 的物理表述是：在均匀介质中传播的平面波，在某时刻 t 振幅 A 随传播距离 x 的形式为

$$A(x, t) = A_0 e^{-\alpha x} e^{i(kr x - \omega t)}$$
$$K = kr + i\alpha$$

式中， A_0 为振幅初值； ω 为角频率； k 为波数； α 为衰减系数。

品质因子 Q 可用声波传播中一个周期内存储的最大能量 W 与周期内损耗能量 dW 的比率来定义，即

$$Q = \frac{2\pi W}{dW}$$

品质因子 Q 与衰减系数 α 的关系是

$$\frac{1}{Q} = \frac{\alpha V}{\pi f}$$

式中， V 为波速； f 为频率。

本研究中测定品质因子 Q 参数，采用频谱比法，其原理是：选用一个几何形态与岩样相同的金属铝样，测定其波形，作为参考波形。假定研究的岩样波形振幅谱为

$$A_1(f) = G_1 A_r(f) \exp[-\alpha_1(f)L]$$

参考铝样的波形振幅谱为

$$A_2(f) = G_2 A_r(f) \exp[-\alpha_2(f)L]$$

式中， L 为样品长度； G_1 和 G_2 为包括几何发散、透射系数和发射系数影响在内的参数，与频率无关； A_r 为接收器响应。

假定在测定的频率范围， $\alpha(f)$ 为频率 f 的线性函数，即

$$\alpha(f) = \gamma f$$

对于具有相同几何形态的岩样和铝样，其振幅谱比有

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = [\alpha_2(f) - \alpha_1(f)]L + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right)$$

利用衰减系数与 Q 的关系，并考虑金属铝的 Q 值大约为 150000，而岩石的 Q 值一般小于 100，则上式可简化为

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = \frac{\pi L}{Q_1 v_1} f + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right)$$

这就是用频谱比法计算 Q 值的基本公式。从公式可知，假定在激发频率（1MHz）为一常数，则 Q 值与振幅比的对数—频率曲线（应该为近似直线）的斜率有关。

弹性参数计算确定方法：利用岩样密度 ρ (g/cm³)，纵波速度 v_p (km/s) 和横波速度 v_s (km/s)，按下面公式确定岩样的弹性参数。

泊松比 ν ：

$$\nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$$

体积模量 K (GPa)：

$$K = \rho\left(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2\right)$$

剪切模量 μ (GPa)：

$$\mu = \rho v_s^2$$

杨氏模量 E (GPa)：

$$E = 3K(1 - \nu)$$

拉梅常数 λ (GPa)：

$$\lambda = 3K \frac{\nu}{1 + \nu}$$

测量系统可靠性分析：选用金属铝作为标准材料标定声波测量系统。表 1-1-2 是系统标定的数据，可以看出，确定系统测量值和标准值的差别是比较小的。

表 1-1-2 系统标定数据（铝样）

	铝的纵波速度 (km/s)	铝的横波速度 (km/s)
标准值	6.350	3.120
系统测量值	6.340~6.360	3.115~3.125
相对误差	±0.15%	±0.22%

2. 流体地震参数的测量设备

实验测定的流体地震参数包括速度 v_f 、密度 ρ 和体积模量 K_f 。其中流体的波速和密度参数直接测量，流体的体积模量参数按以下公式计算获得，即

$$K_f = \rho_f \cdot v_f^2$$

流体地震参数的测量设备：高温高压流体物性测定仪由高温高压容器、压力控制、温度控制、送样器、PVT 测量和声波测量等子系统组成。温度压力控制的原理与前述的波速测定仪类同。高温高压容器如图 1-1-3。

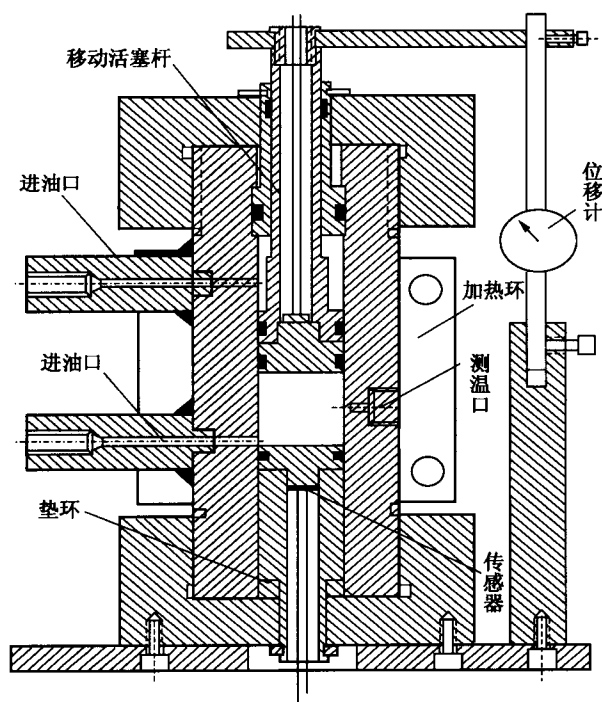


图 1-1-3 流体物性测量高压容器

流体波速测量的方法：把待测的流体传送到高温高压测量容器中，测量声波通过流体样品的时间 t_f 和样品的长度 L （上下活塞的距离），从而获得流体波速为

$$v_f = L/t_f$$

流体密度测量方法：在常压下测定好流体初始密度 ρ_0 ，把待测的流体传送到高温高压测量容器后，记录下样品的初始长度 L_0 ，切断样品仓与外界连接，通过上活塞给样品仓流体样品加压，记录压力下流体样品长度 L 。由于操作过程中流体样品没有损失，可按连续方程计算该压力下流体样品的密度 ρ ，即

$$\rho = L_0/L\rho_0$$

具体的实验操作方式：样品传送是通过样品仓进样口与外界高压送样器相连实现的，操作中要保证待测的流体完全充满高压容器。

声波测量系统和前述岩石物理测量系统基本相同。高压容器上下活塞上各有一纵波传感器，纵波传感器为压电陶瓷 Pzt-5，主频为 1MHz。传感器与方波脉冲发生接收器和数字储存示波器相连，通过上下活塞对接测定声波测量系统基时。

流体长度变化通过测量上活塞杆的位移实现，上活塞杆上的位移用百分表测定，分辨率为 0.01mm。

三、岩石及流体样品实验测试

1. 基本物性参数测量

1) 矿物成分分析

通过薄片分析方法，了解岩石微结构和相关的信息，为岩石物性参数数据库、物性参数规律和岩石物理学模型的建立提供必要的资料。对其中的 400 个岩心样品进行了薄片鉴定，以确定岩石主要矿物成分组成、各种矿物和泥质（基质）的含量、颗粒结构、粒度（径）、钙质胶结物等。同时对所有岩样进行了薄片制作和显微照相，并整理加载到岩石物性参数数据管理系统。

2) 岩心的密度测量

采用游标卡尺测定圆柱形样品的直径和高度,游标卡尺的精度为 0.01mm。采用电子天平测定岩样(干和饱和流体)的重量,电子天平的精度为 0.001g。采用测定的几何尺寸计算岩样的体积,然后根据重量计算岩样的密度。对 535 个样品进行了密度测量。

3) 岩心的渗透率测量

渗透率测试使用国产气测渗透率仪。该仪器通过测量气体(氮气)在一定压差($P_1 - P_2$)条件下通过岩样的流量 Q_0 、岩样的几何参量(长度 L , 直径 D),以及已知气体粘度 μ 和测试环境的气压条件 P_0 ,通过渗透率的基本公式计算得到岩样的渗透率。渗透率 K 的计算为

$$K = (2 P_0 Q_0 \mu L) / A (P_1 - P_2)$$

式中, P_1 为测试岩样进口端的气体压力; P_2 为测试岩样出口端的气体压力(在一般测试条件下 $P_2 = P_0$); P_0 为测试时的大气压; Q_0 为在大气压 P_0 时的气体体积流量; μ 为气体粘度; L 为岩样长度; A 为岩样横截面积。完成了 320 个岩心的渗透率测量。

4) 岩心的孔隙度测量

孔隙度测量使用国产氦孔隙度测试仪。根据孔隙度定义 $\phi = (V_P / V_T) \times 100\%$,孔隙度测试需要测量岩石的孔隙体积 V_P 及相应的岩石总体积 V_T 。该仪器依据气体等温膨胀法原理直接测定岩样的孔隙体积 V_P 和岩样的骨架体积 V_M ,而岩样总体积 $V_T = V_P + V_M$,由此可根据孔隙度定义式计算出岩样的孔隙度。

岩样密度 = 岩样质量 / 岩样总体积,测量岩样孔隙度之前,测得岩样的质量 G ,然后根据孔隙度测量获得的岩样总体积 V_T ,便可计算出岩样密度 ρ ($\rho = G / V_T$)。完成了 535 个岩心的孔隙度测量。

2. 弹性参数测量

1) 常温常压下岩样纵、横波速度测量

岩样为干燥样品。声波传感器置于岩石两端,采用指压方式,使传感器和岩样紧密接触,使用蜂蜜作为耦合介质涂在耦合面上,以改善传感器与岩样之间的接触。完成了 535 个岩心样品的纵、横波速度测量,及确定了杨氏模量、体积模量、泊松比和纵、横波速度比。

2) 储层条件下岩样纵、横波速度测量

把岩石预先处理好,泥岩为干燥样品,其他岩样用水饱和(矿化度为 3%),用耐温的氟橡胶套密封,放进高压容器中,依次加上围压、孔隙流体压力、温度到预定的储层条件围压值。储层温压值由胜利油田预先提供。然后先分别采集样品的纵波和横波波速,测量声波到时确定样品的纵、横波速度。完成了 250 个岩心样品的纵、横波速度测量,及确定了杨氏模量、体积模量、泊松比和纵、横波速度比,计算了品质因子 Q 。

3) 变温变压条件下岩样纵、横波速度测量

岩石预处理方式与 2) 相同,加温压的方式是:先加上第一级围压(最小的)、孔隙流体压力、和第一级温度(最小的),测定其纵、横波速度,然后保持温度和孔隙压,从小到大逐点增加围压,同时分别测定测点上的纵、横波速度。然后降围压到最小点左右,加围压和孔隙压,加热升温到高一级的温度,保持温度和孔隙压力不变,再从小到大逐点增加围压,同时分别测定测点上的纵、横波速度。按这样的方式,按温度从小到大,完成各级温度下,不同压力测点的纵、横波速度测量。

实验研究的类型包括:

(1) 多级温度和不同压力下测定了含不同流体(干、饱油、饱水)的砂岩地震波速度及

其相应的弹性参数, 22 块;

(2) 在高温高压下, 使用连续驱排 (比如用油驱水) 的方法, 连续改变砂岩的含油饱和度, 并测定高温高压下砂岩地震波速度及其弹性参数随饱和度变化, 10 块;

(3) 多级温度和不同压力下测定泥岩速度及其相应的弹性参数, 10 块;

(4) 多级温度和不同压力下测定了含不同流体 (干、饱油、饱水) 的生物灰岩地震波速度及其相应的弹性参数, 11 块;

(5) 多级温度和不同压力下测定白云岩速度及其相应的弹性参数, 4 块;

(6) 多级温度和不同压力下测定火成岩 (玄武岩和辉绿岩) 的地震波速度及其相应的弹性参数, 13 块;

(7) 多级温度和不同压力下测定盐岩的地震波速度及其相应的弹性参数, 2 块。

4) 驱排过程改变饱和度下岩样纵、横波测量

用一种流体 (如油) 把岩石预先处理好, 用耐温的氟橡胶套密封好岩样, 放进高压容器中。加围压、温度到预定值, 然后从岩样一端注入新的流体 (如水)、从岩样另一端收集被驱排出来的流体。开始时排出的是一种流体 (如油被驱排出来), 后来排出流体是混合的, 两种流体静止后会分层, 用计量管计量其中的被驱排出来的流体 (如油) 的数量, 在这过程中同时测量岩样的纵、横波速度。完成砂岩油水驱排样品 9 个。

3. 电性参数测量

岩石电阻率的测量仪器: 采用 Escort 公司的 LCR 仪器, 其型号为 ELC-131D。测量探头直接利用了声波传感器前端的金属缓冲块 (钛合金), 测量频率为 1kHz, 为两极法测量。

两极法测量原理: 在岩样两端加上电极, 电极与数字电桥测量仪连接, 通过数字电桥测量仪可直接测出岩样的电阻 (Ω)。然后再根据岩样的长度 (L) 和截面积 (S), 计算出岩样的电阻率 (ρ)。计算公式为

$$\rho = \Omega \frac{S}{L}$$

具体操作过程: 与储层条件下岩石声波参数测量同时进行。即岩样用矿化度为 3% 的盐水饱和, 放进高压容器中。把温度压力 (孔隙压力) 加到储层条件, 先测量岩石的声波参数, 然后测定该状态下岩样电阻, 按上述公式计算岩样的电阻率。完成了 250 个岩心的电阻率。

4. 岩石物理参数测量误差分析

声波速度的基本计算公式为

$$v = L / (t - t_0)$$

式中, v 为岩石速度; L 为岩样长度; t 为声波到达时间; t_0 为系统基时。

如上所述, 样品长度理论测量精度为 0.01mm。这里保守估计, 设定岩石长度和变形的误差为 0.1mm, 对于长度 25mm 样品, 其长度引起的相对误差应该小于 0.5%

声波旅行时是通过辨认纵波和横波的到达波形来确定。采集到的波形是通过采集设备后的综合结果, 其误差是设备噪声误差和声波起跳识别误差的总和。

对于设备带来的误差 (随机误差), 对波形数据采用了 128 次平均方法采集, 平均处理是利用数值存储示波器内部瞬间实现的。另一个误差来源是波形起跳识别。这两者加起来误差在 1~2 数据点 (0.02~0.04 μ s)。估计 25mm 长的岩样中声波通过时间至少为 10 μ s, 则旅行时引起的误差应小于 0.4%。

系统基时是指声波仪器系统中的传播时间总和, 包括声波在传感器缓冲块中的传播时

间,通过对系统的标定来确定。标定的方法包括传感器的直接对接,或用标准材料标定。其误差由标定的精度来确定。参考上述铝样标定数据,可确定系统基时误差小于0.1%。

按照误差传递理论,波速测量误差 Δv 为长度测量误差 ΔL 、旅行时测量误差 Δt 和系统基时测量误差 Δt_0 的总和,即

$$\Delta v = \Delta L + \Delta t + \Delta t_0$$

密度测量误差为重量测量误差与体积测量误差之和。重量测量理论精度为0.001g。样品重量一般大于10g(多在20g以上),重量测量误差则大大小于0.1%。体积测量误差为长度测量误差的3倍,长度测量理论精度为0.01mm,考虑人为误差,选定长度测量误差为0.3%,则体积测量误差小于为0.9%。因此,密度测量误差为

$$\Delta \rho = \Delta w + \Delta K$$

式中, $\Delta \rho$ 为密度测量误差; Δw 为重量测量误差; ΔK 为体积测量误差。

对于另外几个参数的误差,根据其计算原理,利用上述几个参数的误差数据,确定出它们的误差在1%~2%以内。

5. 流体样品地震属性测量

流体样品地震属性测量包括:

- (1) 纯水和矿化度分别为3%,10%,22%的盐水波速的测量;
- (2) 矿化度为22%的盐水加甲烷气混合流体波速和密度的测量;
- (3) 8个原油样品的波速和密度的测量;
- (4) 8个原油加甲烷气混合流体的波速和密度的测量。

利用上述测量数据,确定了流体的体积模量。

根据上述实验数据,初步分析了气和矿化度对水的地震属性的影响以及不同成分(密度)和含气量对石油地震属性的影响。

第二节 岩石物理参数分析

一、速度与深度、压力的关系

在储层中总存在两种不同压力:上覆岩层压力和储层流体压力(或孔隙压力)。上覆压力与埋藏深度成正比,正常情况下以23kPa/m增长,孔隙压力也与深度或水柱成正比。上覆压力越大,岩石压实变好,裂缝可能闭合,颗粒将接触更好,速度变大。孔隙压力则与上覆压力的作用相反。因此影响地震速度变化的是上覆岩层重量引起的静压力和地层内孔隙流体压力之差,它也称为有效压力或静压力。

1. 实验结果分析

图1-2-1是在孔隙流体压力不变,饱和油、水和气情况下225号砂岩速度随围压变化曲线。图1-2-2和图1-2-3是在干燥样品、孔隙压力相同情况下682号泥岩样和683号生物灰岩样的速度与围压变化关系曲线。无论饱和哪种流体,所有岩石的P波和S波速度随着压力增加而增大。但速度和有效压力的关系呈非线性的,在压力值相对小的压力段,由于孔隙度的变化(孔隙闭合的效应),速度对有效压力敏感,即岩石的波速随压力的增大而增加较快,呈非线性变化;而在压力相对高的压力段,由于岩石的孔隙基本闭合,岩石速度随着有效压力的变化呈线性、平缓变化,速度趋于稳定,变化非常小。对实际地层来说,对于相同岩性的地层,埋藏越深,波速越大,但波速的变化幅度减小。

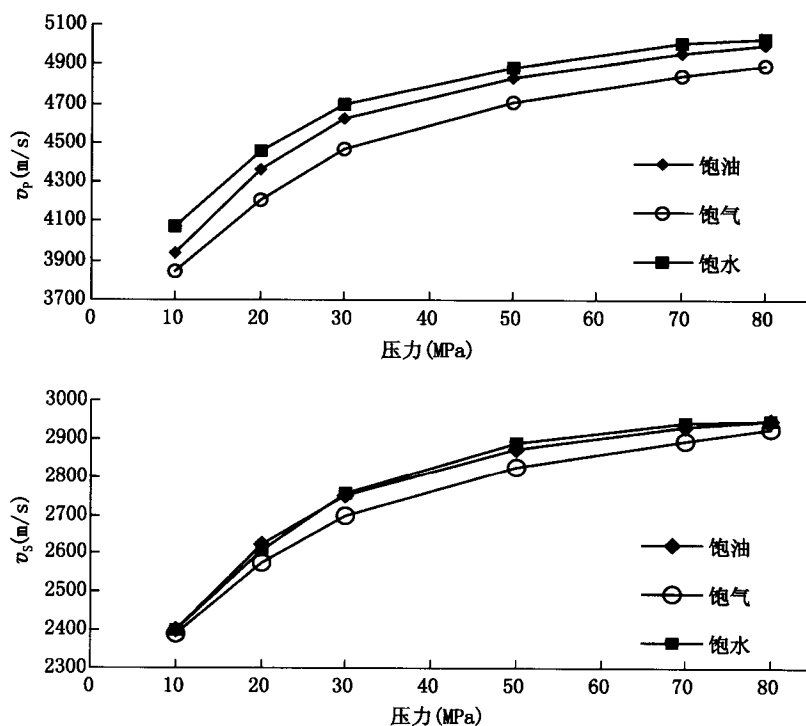


图 1-2-1 225 号砂岩样品饱和不同流体下的纵、横波速度随压力的变化曲线

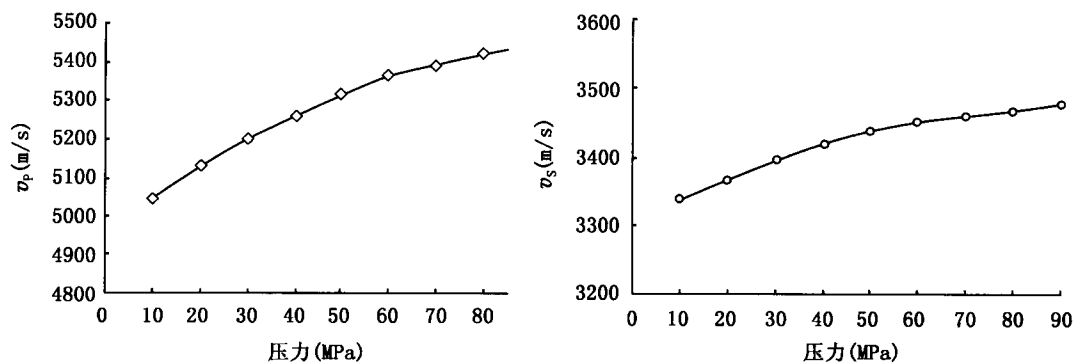


图 1-2-2 682 号泥岩样品（干燥）的纵、横波速度随压力的变化曲线

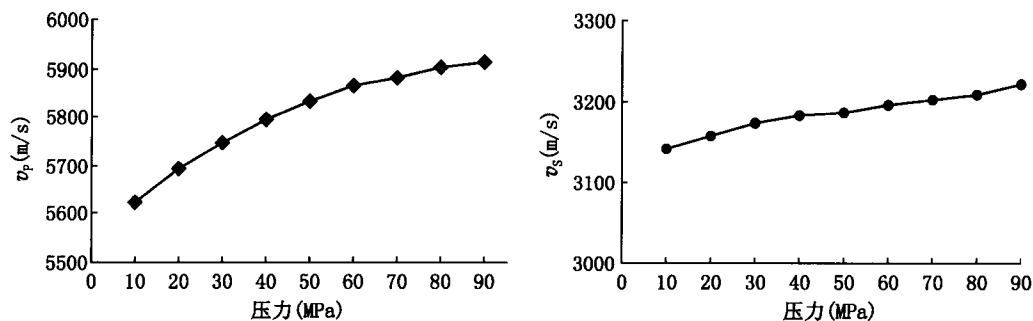


图 1-2-3 683 号生物灰岩（干燥）的纵、横波速度随压力的变化曲线