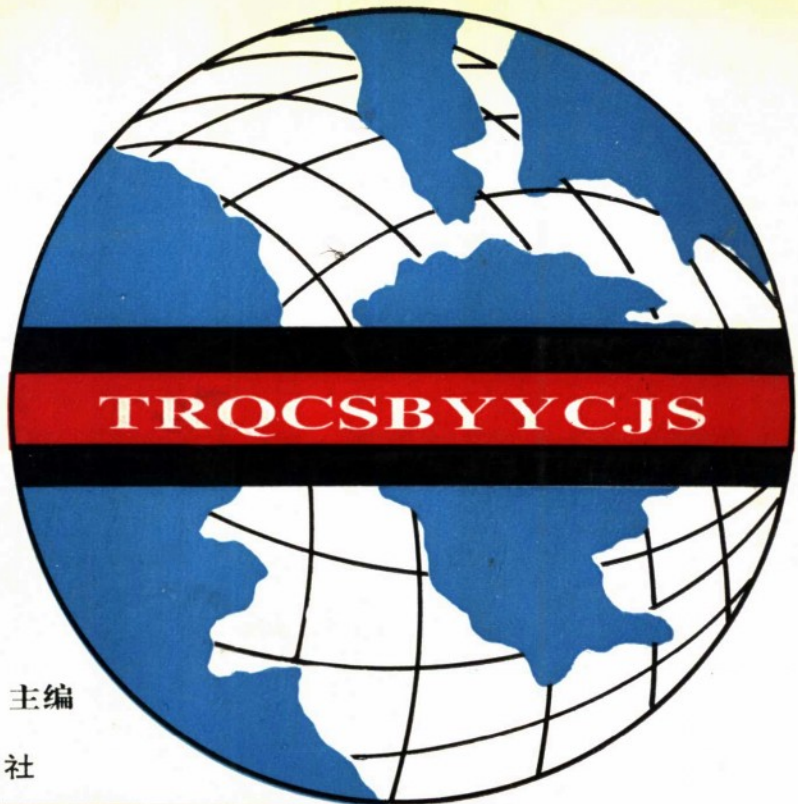




杨云岭 韩文功 主编

石油大学出版社

天然气藏识别 与

预测技术

S

石油工业出版社
PDG

天然气藏识别与预测技术

杨云岭 韩文功 主编

石油大学出版社



《天然气藏识别与预测技术》编委会

主 编:杨云岭 韩文功
副主编:史克宝 余大祥 周尚文 徐观学
编 委:(按姓氏笔划排序)
王兴谋 王衍民 任力成 许卫平
吕功训 李厚裕 李梦庚 李增印
陈嘉树 郑泽继 贺元凯 鹿天柱
曾德钊

天然气藏识别与预测技术

杨云岭 韩文功 主编

*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

青岛胶南印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 10.75 印张 270 千字

1996 年 6 月第 1 版 1996 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1600 册

ISBN 7-5636-0837-0/TE·171

定价:(平) 18.00 元

(精) 28.00 元



序

我国油气比例很不协调,气、油产量当量比远低于俄、美、加等产油气大国。经过近年来的努力,这种局面已经得到明显的改善。胜利油田也是油多气少,经过八五期间的工作,已见到了曙光,但仍未有明显地改善,仍然是会战三十多年来还未解决的重大地质问题之一。气少带来了生产、生活上的一系列困难,矛盾十分突出。

究其原因?一是“重油轻气不管水”,这是在计划经济条件下,人们对天然气矿产资源的偏见。实际上天然气是十分重要的化工原料和优质燃料,是改善一个国家燃料结构的重要组成部分。二是油气虽属同源,但气田的成气成藏规律、评价、识别与预测技术与油相比,完全是两回事,用找油的经验和技術找气是非碰壁不可的。

“天然气藏识别与预测技术”正是在这种背景下产生的,它是国家 85—102 项目的三级课题,是“八五”期间重大科研课题之一。由胜利石油管理局组织物探公司、测井公司、地质录井公司、井下作业公司、地质科学研究所、计算中心等单位共同完成。它突出地集中和发展了多年来具有胜利特色的“亮点”技术,测井资料识别气层及研究盖层技术等从地面到井筒的多种专业联合的天然气勘探系列技术,必将在今后天然气储量增长高峰期内发挥作用,并会在今后大量实践中不断补充完善,成为油气勘探活动中一门大有发展前景的专门学问。

刘兴材

一九九六年三月于东营

前 言

天然气既是重要的能源又是很有价值的化工原料。在世界日趋向现代化发展的今天,重视环境保护的人们更是越来越看重天然气这种清洁燃料在能源结构中的重要地位。世界的天然气勘探和天然气工业正在快速向前发展。

我国从“六五”以来为加速天然气工业的发展,改善油气比例不协调的问题,逐渐增加了天然气科技攻关的力度和勘探工作量,使我国天然气储量有较快的增长。但是,以往的攻关侧重于成气机理、盆地评价等方面,对具体的天然气勘探技术方法涉及不多,天然气勘探一般是借用石油的勘探技术。特别在我国东部油区砂泥岩沉积地层中勘探天然气更缺少先进的方法技术。为此,设立了国家级科研课题“东部地区天然气藏识别与预测技术的研究”,为85-102项目的一个三级课题。由胜利石油管理局负责,其他一些单位参加。经过五年的奋力攻关,克服种种困难,顽强苦干,以大量的施工作业和实物工作量为基础,潜心研究,勇于探索,获得了丰硕的科研成果。特别是浅层气藏的地震识别及定量描述技术、天然气测井解释专家系统、气层录井方法的改进以及带井筒积液的试井技术方法等,更具有独到之处,并经过生产实践检验,取得了良好的经济效益。整个科研课题在通过国家验收时,得到很高的评价。本书重点把参加科研攻关的胜利石油管理局内各专题的科研成果汇集成册,形成一套较完整的天然气勘探技术系列,介绍给广大读者,以期对天然气勘探事业的发展作出应有的贡献。

全书分上下两篇共十二章。上篇为地面技术,共八章;下篇为井筒技术,共四章。第一章由韩文功、李红梅、杨云岭等编写,第二章由杨云岭、王兴谋、韩文功等编写,第三章由李国林、韩文功、杨云岭、王兴谋等编写,第四章由吕功训、曲良河、李云典等编写,第五章由郑泽继、胡立新、吕公河等编写,第六章由贺元凯等编写,第七章由王衍民、周建宇、陈世英等编写,第八章由许卫平、叶古青、孙剑等编写,第九章由刘其春、王志勇、陈锡武、许章言等编写,第十章由张晋言等编写,第十一章由顾兆宇、司佑杰、庞尚海等编写,第十二章由任力成、张德志、李友全等编写。全书由韩文功整理定稿,杨云岭主审。

另外参加科研攻关及为本书的编写做过工作的主要人员还有:周尚文、余大祥、史克宝、曾德钊、陈嘉树、李厚裕、鹿天柱、徐观学、李梦庚、汪云家、李惠玲、张金伟、曲寿利、孙永福、董臣强、苏朝光、刘金联、王金铎、谭绍泉、卢春喜、刘太生、魏福吉、高中录、段卫星、杨玉德、尚新民、吴瑞金、张文娟、付金荣、许学平、贺业林、于正军、于建国、王景全、陈柱泽、李秘、张效文、宋光德、邹文勇、孟恩、张丽敏、赵欣、刘忠、彭少华、马景贤、杨富周、左文渊、吕健儒、王君、刘中奇、王文丽、吴金丽、于宗奎、张复中、张立新、薛元真、李凤鸣、李振泉等。王兴谋、王文争为本书的文图整饰做了大量工作。

本书所属内容在研究过程中曾得到胜利石油管理局刘兴材副局长等领导的热情关怀和指导,得到胜利石油管理局科技处、地质处和勘探公司的大力支持和指导,得到各参加单位领导的关心和帮助,谨此一并表示衷心的感谢。

由于时间和编写水平的限制,书中缺点及错误在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

上篇 地面技术

第一章 天然气藏地震识别技术的岩石物理性质研究	1
§ 1-1 岩心岩石弹性物性参数的实验室测量及分析	1
§ 1-2 纵、横波 VSP 测井资料的整理与分析	3
§ 1-3 声波测井资料分析及应用	4
§ 1-4 气藏的物理模型研究	6
§ 1-5 岩石物性参数综合分析及应用	6
第二章 浅、中层砂岩气藏的地震亮点识别与定量描述	13
§ 2-1 地震识别	13
§ 2-2 定量描述	18
第三章 AVO 找气技术	27
§ 3-1 AVO 技术原理与基础	27
§ 3-2 针对 AVO 信息的野外采集与处理	29
§ 3-3 AVO 资料的解释研究	32
§ 3-4 应用分析	36
第四章 τ - P 域 AVO 分析技术	39
§ 4-1 基本原理	39
§ 4-2 处理方法	40
§ 4-3 应用效果分析	42
第五章 深层地震勘探的野外采集方法	50
§ 5-1 深层地震信号的特点及对方法研究的影响	50
§ 5-2 干扰波和表层结构的调查研究	51
§ 5-3 野外采集参数的研究及施工因素的选择	52
§ 5-4 效果分析	58
第六章 深层地震资料处理方法及效果	60
§ 6-1 频谱分析试验	60
§ 6-2 速度研究	61
§ 6-3 偏移研究	66
§ 6-4 高频补偿	66
§ 6-5 最终剖面效果	70
第七章 深层天然气藏地震解释方法	73
§ 7-1 深层气藏的形成条件	73
§ 7-2 深部气藏勘探目标选择	73

§ 7-3 解释方法	74
§ 7-4 应用效果及分析	78
第八章 快速地面化探找油、气技术	86
§ 8-1 化探基本原理及发展现状	86
§ 8-2 化探资料采集	86
§ 8-3 化探资料处理	93
§ 8-4 化探资料解释	94
§ 8-5 快速化探的应用范围	100

下篇 井筒技术

第九章 钻井过程中气层判别方法	102
§ 9-1 气层录井方法的改进	102
§ 9-2 气层的判别方法	106
§ 9-3 气层判别解释系统	108
§ 9-4 效果分析	112
第十章 天然气测井探测及评价技术	113
§ 10-1 天然气测井探测技术	113
§ 10-2 天然气测井评价技术	114
§ 10-3 天然气测井解释专家系统	123
第十一章 天然气层测试技术	135
§ 11-1 气层测试原理	135
§ 11-2 气层测试设计计算	138
§ 11-3 现场试验及成果	142
第十二章 天然气藏试井技术	143
§ 12-1 气井产能评价	143
§ 12-2 受井筒积液影响的压力恢复资料解释研究	147
§ 12-3 气井不稳定试井资料的解释和应用	154
§ 12-4 气井试井施工中存在的几个问题	161



上篇 地面技术

第一章 天然气藏地震识别技术的 岩石物理性质研究

岩石物理性质研究是地球物理勘探尤其是岩性地震学研究的重要基础工作,国外在这方面研究工作开展较早,比较系统,特别是从 70 年代中期开始 Domenico^{[1][2]},Gregory^[3]等人开展的岩石物理性质实验室研究,取得了一些有价值的成果,促进了诸如亮点、AVO 等岩性地震学方法的应用和发展。

国内关于岩石物理性质的研究起步较晚,资料积累尚显不足,一个典型的事例是关于亮点找气认识的争论——过去有人认为东部地区气藏均属暗点型,但后来许多研究资料证实^[4],东部地区浅层气藏地震反射是亮点特征。暗点论的错误在于对地层岩石物理性质认识的有误所致,即所用的普通水基泥浆声波测井曲线,由于受到泥浆浸泡作用发生畸变,而不能反映客观的物理性质。所以应特别强调原地情况下的岩石物理性质研究,而不仅仅借鉴前人或其它地区的理论分析或实验结果。

§ 1-1 岩心岩石弹性物性参数的实验室测量及分析

一、实验样品的采集与实验要求

(一) 采样

实验针对天然气识别研究的需要,以气井的钻井岩心为主,样品的采集主要以砂岩为主,少数泥岩,特殊岩性(包括火成岩、灰岩、砾岩);层位主要为上第三系明化镇组(Nm)和馆陶组(Ng)。

(二) 实验要求

1. 对砂岩样品进行模拟地下压力条件下含气、水、油三种介质的参数测定。气用氮气模拟,水用矿化水模拟,油用柴油模拟。

2. 对泥岩的测量在水润湿、原状态下进行。

3. 泥岩高压充气,火成岩、灰岩、砾岩含气、水、油的状态下测量。

测定参数为岩石的弹性物性参数:纵波(P 波)速度 V_P ,横波(S 波)速度 V_S ,密度 ρ ,泥质含量 C ,泊松比 σ ,孔隙度 Φ ,弹性模量 μ 。

二、实验设备与方法

(一) 实验设备

该实验采用常规三轴应力试验仪,在模拟地下应力状态下,可同时测量岩心岩石的动、静态弹性参数。其中由 HP3054 型数据采集/控制系统记录轴向载荷、轴向应变、横向应变,进而

计算静态泊松比、弹性模量;由超声波岩石参数测定仪记录纵横波时差,计算动态弹性参数。

(二) 实验方法

将岩心、声波探头装入橡胶套内,并固定在高压釜底座上,再装上高压釜釜体,使高压釜内充满液压油,盖上上盖。对每级实验,在围压和孔隙压力一定的情况下,不断增加轴压,并记录动、静态参数;一级实验结束后,改变围压和孔隙压力做另一级实验。

岩心的密度是通过称重、测体积后求得的,孔隙度是通过压汞实验法求得的,泥质含量是通过 X 射线衍射测得的。

三、实验数据整理与分析

根据实验要求测得岩心的各项参数,通过分析这些实验数据得到以下认识:

图 1-1 是砂岩声波速度与围压的关系图,实验中用围压的变化来模拟埋深的情况。速度随围压的增大,不论是加气、饱水还是饱油, V_P 、 V_S 均有不同程度的增加。在相同应力条件下,岩心充气后与充水、充油相比,纵波速度要下降 50~500m/s。并且下降值的大小以及 V_P 、 V_S 随围压变化的幅度与孔隙度有关。一般说来,孔隙度越大, V_P 、 V_S 随围压变化幅度越大,充气后 V_P 下降值也大。

砂岩的动态泊松比与孔隙度和泥质含量有关,与围压关系不大,动态泊松比普遍大于静态泊松比,二者之间没有明显关系;静态弹性模量主要受有效围压的控制,随围压增大而增大,动、静态弹性模量之间呈幂函数的关系。岩石动、静态弹性参数差别的主要原因是岩心内部存在微裂隙及各向异性。孔隙压力的变化对动、静态弹性参数影响不大,但与零孔隙压力相比,有孔隙压力时,静态弹性模量、泊松比均明显增大。

图 1-2 是泥岩样品的速度与围压关系

图,该岩样取自埋深 785m 的明化镇组地层,测得速度随围压增加而增加,同时作了高压 (30MPa) 充气的实验,泥岩在高压充气环境下其声波的纵波速度也降低 200~300m/s,这项结果提示我们,很薄的高压气层可能气化部分围岩而使气藏易于识别,同时也影响着定量解释的精度;致密岩性如火成岩、灰岩充气后, V_P 、 V_S 也有不同程度的下降。

图 1-3 是取自埋 110-4 井 1859~1868m 泥质砂岩样品的声波速度与含气饱和度的关系图^[5],岩样的孔隙度变化在 8%~22% 之间,声波的纵波速度总体上随含气饱和度的增加而降低,横波速度变化不大。近纯含气状态下速度变高是由于在实验室条件下,岩石颗粒表面化学吸附层中由于水的丧失,吸附层变干,表面能量增大,颗粒接触的刚度增加而引起的。

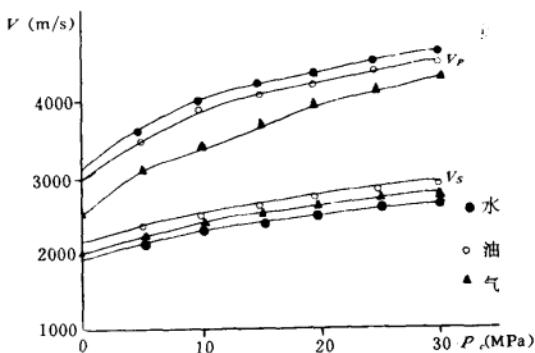


图 1-1 砂岩声波速度与围压的关系图

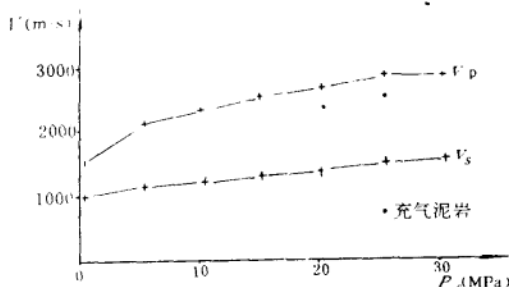


图 1-2 泥岩声波速度与围压的关系图

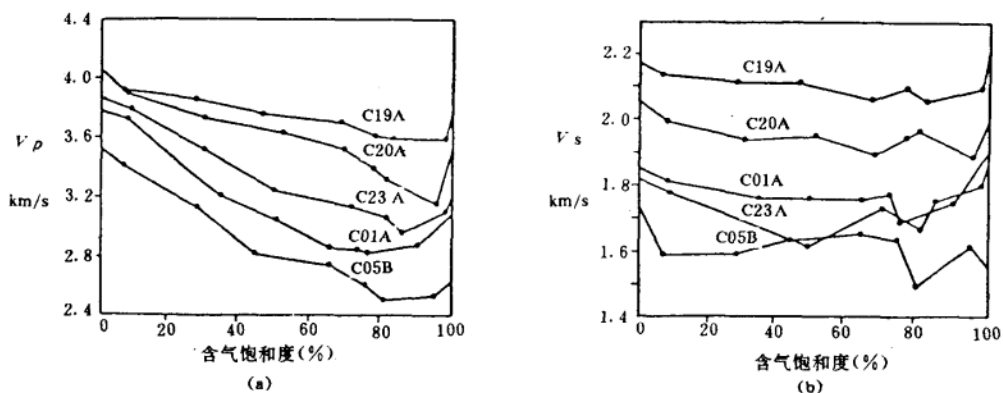


图 1-3 实验室测得声波的纵波 (a)、横波 (b) 速度与含气饱和度的关系 (据黄乔松)

§ 1-2 纵、横波 VSP 测井资料的整理与分析

纵、横波 VSP 测井方法可获取岩石的纵、横波速度参数,并进一步衍生其它物性参数,如泊松比、弹性模量(见图 1-4)。由于 VSP 方法的工作条件(如地震波的传播、频率等)和地面地震方法相近,因此 VSP 方法求取的岩石物性参数更适合于地震解释。

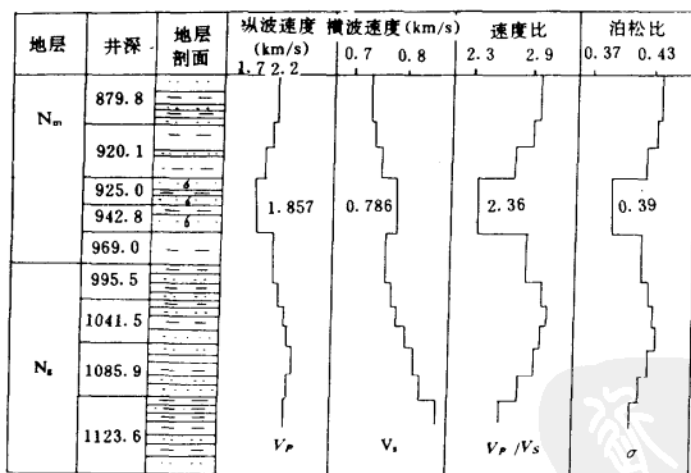


图 1-4 盐气 2 井 VSP 的岩性参数

一、济阳坳陷多波速度参数的建立

(一) 速度模型的选取

地层的连续介质速度模型:

$$V = V_0(1 + \beta Z)^{1/n} \quad (1-1)$$

是地震勘探中最常用的速度模型,式中 V 为深度 Z 米的地层速度, V_0 、 β 、 n 为速度参数。研究

中引入了根据最小平方误差建立的速度模型^[6],扩展了速度模型的实际应用范围,并提高了拟合精度。

(二) 建立适合气藏解释的纵、横波速度参数

利用已知的 VSP 资料加上气藏钻探的反馈信息,建立适合各区的精确的速度参数。如在陈家庄地区,速度资料来源于盐气 2、陈气 13 井 VSP 测井资料及亮点反求速度(亮点反求速度 $V_i = \frac{2H_i}{T_i}$, H_i 为钻遇气藏的深度, T_i 为亮点气藏在地震剖面上的反射时间),建立起地层声波的速度参数,提高了地震解释时深转换的精度,随着多波技术的进一步发展,十分有必要建立济阳坳陷横波及转换波的速度参数,本章利用纵、横波 VSP 资料建立横波及转换波速度参数(图 1-5),为本区全面开展多波勘探提供基础资料。

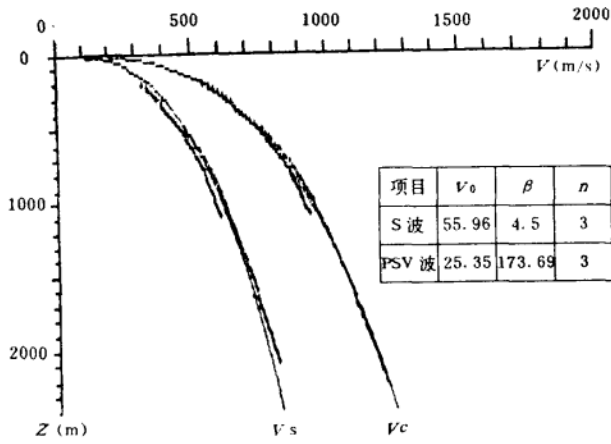


图 1-5 济阳坳陷横波、转换波平均速度图
(V_s 表示 S 波速度, V_c 表示 PSV 波速度)

二、VSP 资料与声波测井资料结合求取气层速度

VSP 方法可测量地层的纵、横波速度,但由于测点距较大,测量的是一套地层的平均特性,对局部岩性不够准确,而声波测井由于钻井钻开气层后气的逸散而使气层速度往往测不准,联合使用 VSP 资料和声波测井资料以更准确地求取气层速度。

参考测井曲线及 VSP 资料将两测点间的地层细分为较均质的若干层,各层的厚度及速度由声波测井资料取得,这样由式(1-2)可求出气层的速度。

$$V_{\text{井}} = \frac{L_{\text{气}} + L_1 + L_2 + \dots + L_n}{\frac{L_{\text{气}}}{V_{\text{气}}} + \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2} + \dots + \frac{L_n}{V_n}} \quad (1-2)$$

式中, $L_{\text{气}} + L_1 + L_2 + \dots + L_n = L$ 为测点距, $V_{\text{井}}$ 为两测点间的 VSP 测井层速度, $V_{\text{气}}$ 为气层层速度, $L_{\text{气}}$ 为气层厚度, $V_1, L_1, V_2, L_2 \dots$ 为其它均质层的速度及厚度。

§ 1-3 声波测井资料分析及应用

普通声波测井是指在水基泥浆中用短源距声波测井仪器测量声波在地层中的传播时差,由于泥岩受泥浆浸泡使声波时差增大产生畸变,导致泥岩速度降低,其原因是由于地层中蒙脱

石遇水膨胀引起的。蒙脱石为晶形结构的粘土矿物，层间结合力弱。声波时差畸变范围与沉积相和埋深有关，河流冲积相和三角洲平原相中的细粒沉积物富含蒙脱石，易导致声波畸变，蒙脱石在一定埋深时会转化为伊利石，因而声波畸变段也与埋深有关。

除泥岩层受泥浆浸泡速度变低外，气层速度一般也测不准。这是因为钻井过程中井眼附近气层中的气体已逸出，泥浆浸入，这样必然使声波测井的气层速度比实际高，图 1-6(a)为陈气 11 井声波时差受以上因素影响发生畸变，图 1-6(b)是与陈气 11 井钻遇同一气藏的陈 53 井综合测井图，它的声波时差却未受浸泡等因素的影响。这是由于钻井周期的长短不一，浸泡时间不一样，泥浆性能的好坏不一，对气层的污染也不一样。

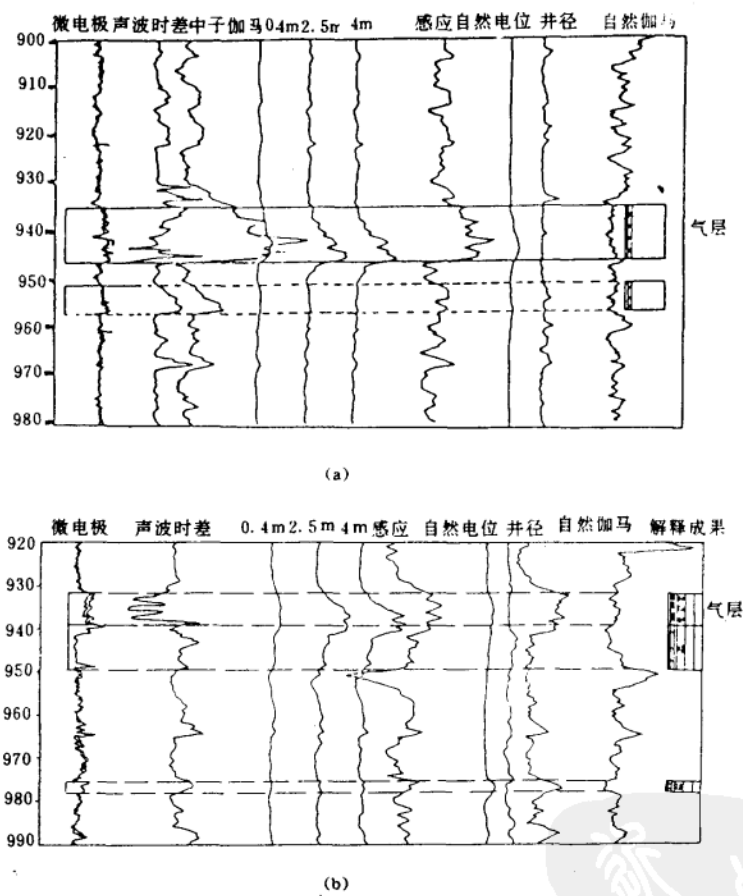


图 1-6 气层在测井曲线上的响应

由普通水基泥浆声波测井统计的资料可能造成地震反射分析的错误，而油基泥浆、长源距测井可在一定程度上克服这一缺陷。用长源距测井仪，从全波测井信息中计算出纵、横波时差，进而求取地层的纵、横波速度。但据楚泽涵^[7](1985)等人认为目前 Schlumberger 公司处理全波列测井资料得到的横波速度(V_s)，实际上应为瑞利波速度(V_R)。纵波、瑞利波速度与泊松比的关系是：

$$\frac{V_P}{V_R} = \frac{1 + \sigma}{0.87 + 1.2\sigma} \left[\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

由于 $V_R < V_S$, 所以, 由测井资料计算的泊松比偏大, 在用测井资料计算时应用式(1-3), 而不是实际勘探中常用到的泊松比:

$$\sigma = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2[(V_P/V_S)^2 - 1]} \quad (1-4)$$

尤其对 σ 值较小的地层(如气层), 式(1-4)的误差大于 10%。

§ 1-4 气藏的物理模型研究

地质模型为一浅层河流相含气砂岩透镜体, 如图 1-7 所示, 含气砂岩声波速度、水砂岩声波速度、泥岩声波速度及泊松比、密度参数的选取综合考虑了由声波测井、VSP 测井等资料得到的济阳坳陷浅层气藏的典型物性参数。

选取合适的材料对地质模型进行模拟。泥岩用石蜡模拟, 砂岩用锯末孔隙材料模拟, 在水槽中进行模拟野外观测, 24 次覆盖, 测线长 1km, 最大炮检距 1040km, 道间距 20m, 地震波频率 30~35Hz。将观测结果记录成带, 并进行资料处理。

图 1-8 是模型的水平叠加剖面, 证实了气层的强振幅反射以及伴随的绕射、速度下拉现象, 在道集上气层具有振幅随偏移距增大而增大的特征。

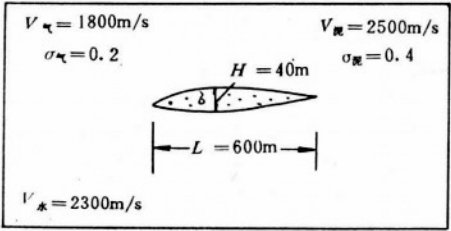


图 1-7 浅层含气透镜砂体的地质模型

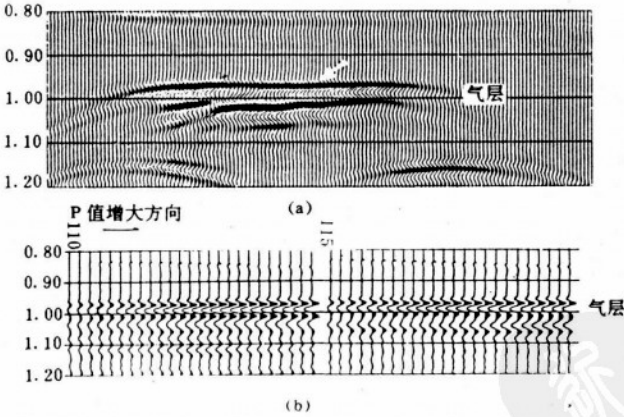


图 1-8 气藏物理模型的叠加剖面(a)和 CMP 道集(b)

§ 1-5 岩石物性参数综合分析及应用

一、理论分析

声波速度是地震勘探中的一个重要参数, 根据波动力学推导, 弹性地层纵、横波速度表示如下:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1-5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1-6)$$

式中: K —— 体积模量;

μ —— 切变模量或横波模量;

$M = K + \frac{4}{3}\mu$ —— 空间模量或纵波模量。

Gassmann 于 1951 年提出在一密闭的近似各向同性和均匀的条件下,饱和流体的多孔岩石的弹性模量可用式(1-7)表示:

$$K = \frac{K_s(\bar{K} + Q)}{K_f + Q} \quad \text{其中 } Q = \frac{K_f(K_s - \bar{K})}{\Phi(K_s - K_f)} \quad (1-7)$$

式中: K —— 饱和流体岩层的体积模量;

K_s —— 岩石固体物质的体积模量;

$\bar{K}$ —— 岩石骨架(孔隙中不含流体)的体积模量;

K_f —— 孔隙内流体的体积模量;

Φ —— 孔隙度。

White 给出了多孔介质(或岩石)充满流体时 M 的具体计算公式:

$$M = \frac{3(1-\sigma)\bar{K}}{1+\sigma} + \frac{(1-\bar{K}/K_s)^2}{\Phi/K_f + (1-\Phi)/K_s - \bar{K}/K_s^2} \quad (1-8)$$

式(1-8)称 White 公式,式中的 σ 是岩石骨架的泊松比,对于一般砂岩 $\sigma=0.1$ 。

式(1-5)和(1-8)就是含水砂岩的速度(或孔隙度)已知时,计算气层速度的公式,可以计算不同含水饱和度时的气层速度,但对于气、液混合层最好还是利用 Biot-Geertsma 方程^[8]:

$$V = \left\{ \frac{1}{\rho} \left[(\beta K_s + \frac{4}{3}\mu) + \frac{(1-\beta)^2}{(1-\Phi-\beta)/K_s + \Phi/K_f} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

式中: $\beta = K/K_s$;

$$\mu = \bar{\mu} = \frac{3\bar{K}(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)}.$$

上述理论公式是在理想条件下推导出来的,由于弹性参数难以准确确定以及地下地层的复杂性,因此在实际应用时要具体问题具体分析。

二、亮点反射形成机制及砂泥岩层序中亮暗模型

(一) 亮点反射的形成机制

所谓亮点,狭义的说是指在地震剖面上由于地下气藏存在而引起的相对增强的地震振幅。那么地层含气后是如何引起地震振幅增强的呢?下面予以分析:

1. 地层含气后的物性参数变化

(1) 速度

理论分析和实践资料证明,地层含气后,纵波速度(V_p)要降低,下降的幅度主要与地层的孔隙度、孔隙结构及含气饱和度有关。孔隙度大 V_p 下降幅度也大,含气后不但孔隙砂岩 V_p 降低,岩心实验表明一些裂隙性的火成岩、灰岩、泥岩含气后 V_p 也降低。

(2) 密度

岩层的密度主要由岩层基质成分、孔隙度、岩石孔隙中所含流体的成分和含量而定,当孔隙中只含水或只含气时:

$$\rho = \Phi \rho_f + (1 - \Phi) \rho_r \quad (1-10)$$

式中: ρ ——岩层密度;

ρ_f ——岩石孔隙中所含流体的密度;

ρ_r ——岩石基质密度;

Φ ——岩石孔隙度。

而当岩石孔隙中同时含有气、水时:

$$\rho = \Phi(1 - S_g) \rho_w + S_g \rho_g + (1 - \Phi) \rho_r \quad (1-11)$$

式中: ρ_w ——水的密度;

ρ_g ——气的密度;

S_g ——含气饱和度。

可以看出,岩石孔隙中含气饱和度越大,岩层的密度越低;孔隙度越大,密度越低。

(3) 泊松比

地层的泊松比用式(1-12)表示:

$$\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]} \quad (1-12)$$

地层含气后 V_p 下降, V_s 基本不变, V_p/V_s 下降, 泊松比降低, 下降幅度与 V_p 的下降幅度有关。

2. 形成亮点反射的因素解析

R. E. 谢里夫从物理上系统地分析了影响地震反射波振幅的因素,但我们最感兴趣的是与地层有关的因素,即反射系数、叠加及调谐的影响。下面以济阳坳陷第三系亮点气藏为例对形成亮点的因素予以分析。

(1) 反射系数

表达反射系数最精确的公式是 Zoeppritz 方程,垂直入射时反射系数用式(1-13)表示:

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (1-13)$$

式中: ρ_1, V_1 ——为上层密度与速度;

ρ_2, V_2 ——为下层密度与速度。

反射系数也可表示为下面的近似式:

$$R \approx \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = R_D + R_V \quad (1-14)$$

式中: $R_D = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ ——指密度对反射系数的贡献;

$R_V = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}$ ——指速度对反射系数的贡献。

在实际地层层序的速度、密度变化范围内,近似公式(1-14)与(1-13)的误差是很小的,即可用近似公式来估计密度和速度对总反射系数的贡献。常用的伽德纳公式($\rho = 0.31V^{0.25}$)密度对总反射系数的贡献约占 20% 左右,速度的贡献占 80% 左右,而在一般地层层序中伽德纳公式对其密度、速度的描述是合适的,也就是说,在正常地层层序中密度对反射系数的贡献大约是 20%。

但对于济阳坳陷的浅层气藏,按 $\Phi = 30\%$, $S_g = 55\%$, $\rho_r = 2.65$ (骨架密度), $\rho_g = 0.1$, $\rho_w =$

1,用(1-11)式可计算出含气后岩石密度为 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$,这样含气前后密度、速度对反射系数的贡献列于表 1-1。

表 1-1 含气前后速度、密度对反射系数的影响

内容	含气前	含气后	含气前后反射系数比较
围岩(ρ, V)	$V_1=2500 \rho_1=2.19$	$V_1=2500 \rho_1=2.19$	
砂层(ρ, V)	$V_2=2400 \rho_2=2.17$	$V_2=1900 \rho_2=2.0$	
总反射系数 RR	-0.025	-0.18	$RR_{\text{后}}/RR_{\text{前}}=7.2 \quad Rv_{\text{后}}/RR_{\text{前}}=5.5$
R_D	-0.0046	-0.045	$R_{D\text{后}}/R_{D\text{前}}=9.98$
R_v	-0.0204	-0.136	$Rv_{\text{后}}/Rv_{\text{前}}=6.68$
R_D/RR	18.17%	25.1%	

由表 1-1 可以看出:

① 地层含气后速度、密度下降,因而形成强反射界面。上例中,含气前后总反射系数之比达 7 倍以上。

② 形成亮点强反射主要是由于速度降低引起的,含气后速度贡献是含气前的 5.5 倍。

③ 由于地层含气后密度降低,含气后密度对反射系数贡献比含气前密度对反射系数贡献大,用 Gardner 公式计算的密度贡献约 20%,而上例中含气后密度贡献达 25%。

上述计算虽不能代表普遍的意义,但也能说明形成亮点反射的定量关系。

(2) 叠加影响

由于浅层气层反射有明显的 AVO 效应,即振幅随偏移距增加而明显增大,其增大的幅度主要与气层与围岩的泊松比差有关。因此,我们看到的水平叠加剖面的地震波振幅受叠加影响很大,如图 1-9 气层反射,振幅随偏移距增加而增大,叠加后振幅增强,叠加振幅取决于偏移距的范围大小及气层与围岩间泊松比差值大小。偏移距越大或泊松比差值越大,振幅就越强。

(3) 调谐对振幅的影响

调谐作用是两个靠近的反射界面相互干涉造成的,它可能使合振动的振幅增强也可能减弱。济阳坳陷浅层砂岩层较薄,气层厚度均小于调谐厚度,厚度对反射波振幅有影响,但影响反射波振幅强度的主要因素还是由于气层的存在导致速度降低产生的影响。

(二) 济阳坳陷浅层砂泥岩层序中的亮、暗模型

如图 1-10,济阳坳陷上第三系泥岩层序中,浅层泥岩地震波速度略大于砂岩地震波速度,随深度增加速度增大,砂、泥岩地震波速度存在超越点,浅层地层的泊松比值大,含气后泊松比降低。总的来说,地层岩石的泊松比随深度的增加而减小。根据图 1-10(c)可进行亮、暗区域划分。

1. 浅层砂岩地震波速度略低于围岩速度,含气后速度大大降低,密度也降低,与围岩存在较大波阻抗差,在地震剖面上形成强振幅反射,属亮点型地层剖面。

2. 地震波在中层砂岩中的速度高于在围岩中的速度,砂岩含气后地震波的速度低于围岩

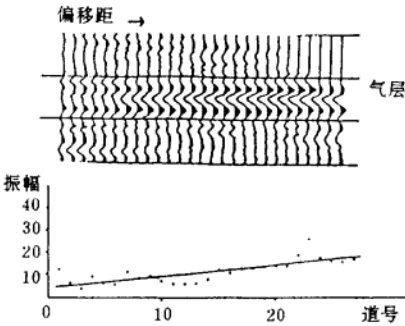


图 1-9 A127.6 测线 CDP468 道集
气层振幅分布图

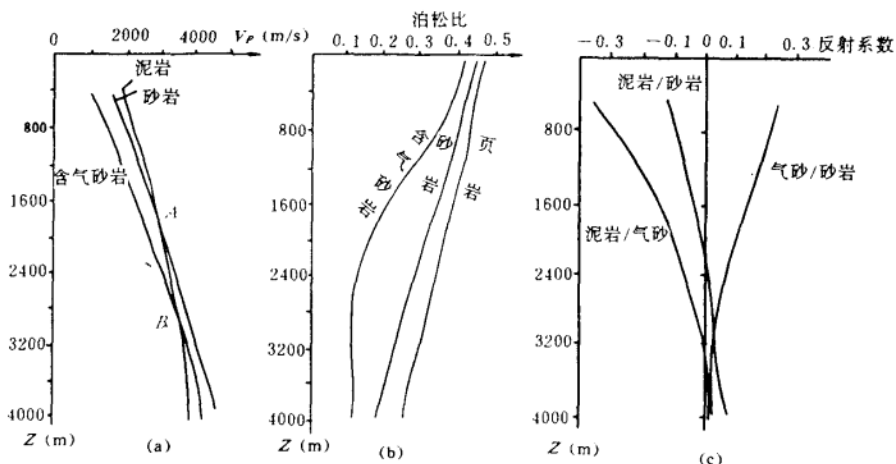


图 1-10 济阳坳陷第三系砂泥岩地震波速度(a)、泊松比(b)分布图及反射系数-深度曲线(c)

中的速度。在 1500~2000m 之间,含气砂岩与围岩亦存在较大的波阻抗差,当砂体较薄时,在地震剖面上呈极性反转型亮点。当砂体较厚存在气/油或气/水界面时,出现平点。在 2000~2800m 之间,含气砂岩地震波速度略低于围岩地震波速度,气水边界存在极性反转,但振幅不强,形不成亮点。

3. 深层地震波的速度是砂岩的波速大于泥岩的波速,含气后砂岩波速与泥岩波速相差不大,形不成亮点。

图 1-11 为一厚 6m 的气层在不同深度的模型反射,从亮点到非亮点过渡的情况。

深度	含 气 前			含 气 后			备注
	波阻抗	反射系数	地震记录	波阻抗	反射系数	地震记录	
浅中层							亮点
							亮点 极性反转
深层							非亮点 极性反转
							非亮点

图 1-11 气层地震反射的亮暗模型

三、AVO 预测特征

AVO 技术是继亮点技术之后又一项利用振幅信息研究岩性、检测油气的重要技术,根据