

致密碎屑岩储层流体 判别方法

杜增利 徐 峰 刘福烈 / 著

Fluid discrimination
in tight clastic
reservoir



科学出版社

致密碎屑岩储层流体判别方法

杜增利 徐峰 刘福烈 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

常规的基于海相砂岩的流体判别方法在致密碎屑岩中遇到挑战,在覆压孔、渗特征分析基础上,本书提出了反映速度和密度变化特征的 AVO 近似方法和不依赖纵横波速度比假设的纵波速度、横波速度、密度重构算法,并依据典型致密砂岩段的实验室测定结果构建了流体判别因子。

本书可供地球物理勘探工程师与物探管理人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

致密碎屑岩储层流体判别方法 / 杜增利, 徐峰, 刘福烈著.

—北京: 科学出版社, 2015.5

ISBN 978-7-03-044300-7

I. ①致… II. ①杜… ②徐… ③刘… III. ①碎屑岩-孔隙
储集层-储集层流体流动-研究 IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 100646 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 陈 靖

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

—科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 5 月第一次印刷 印张: 7 1/4

字数: 148 千字

定价: 69.00 元

前 言

随着勘探程度不断深入,以低孔、低渗为特征的致密碎屑岩储层的储层预测与流体判别方法备受关注。与海相砂岩不同,受沉积环境影响,致密碎屑岩储层横向非均质性强,油气富集不只与构造有关,更与致密背景下相对高孔、高渗储层的发育状况关系密切,其孔隙流体的性质、分布异常复杂。

利用地震资料进行孔隙流体判别主要有两种方式:一种是利用多波、多分量地震记录中的转换横波信息研究介质的岩石物理参数特征,但其处理、解释方法目前仍处于探索、研究阶段;另一种是利用常规纵波地震资料中携带的隐含岩性信息研究介质的岩石物理参数特征,也就是叠前反演技术,包括 AVO/AVA 和叠前弹性反演。

目前,利用 AVO 进行流体检测主要采用 Shuey 两项近似及其衍生方法,其假设条件在陆相碎屑岩储层并不成立;利用弹性阻抗进行流体检测时主要采用交会分析方法,而交会图法严重依赖研究者的实际工作经验,其判别结果往往因人而异。

苏里格气田致密储层段纵、横波速度比约为 1.7,相对于速度变化率而言,含气砂岩段的密度变化率相对较低,据此提出新的反映速度和密度变化特征的 AVO 近似方程,理论模型反射系数计算和实际资料分析表明,该近似方法精度高;结合依据实验室测定结果构建的流体判别因子,新的 AVO 分析方法能够较准确地预测孔隙流体。在利用弹性阻抗进行流体判别方面,在分析目前业界广泛应用的重构算法及其假设基础上,提出了不依赖纵、横波速度比假设的纵、横波速度和密度重构算法, Marmousi2 模型的测试结果表明,在最大入射角超过 30° 时,改进算法可以准确重构各项参数。最后,在综合分析全波列测井资料和岩心样本的实验室测定结果基础上,通过 AVO 正演模拟与反演、叠前弹性阻抗反演并利用多角度弹性阻抗重构岩石物理参数、叠后储层参数反演、地震属性分析等多种方法的综合应用,探索了致密碎屑岩储层的流体判别方法。

由于作者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

2015 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究动态	2
1.2.1 AVO/AVA 技术	4
1.2.2 弹性波阻抗技术	6
1.2.3 下二叠统盒8段储层地震预测	7
1.3 主要研究内容与关键技术	8
1.3.1 主要研究内容	8
1.3.2 关键技术	9
第2章 储层物性特征	10
2.1 孔隙类型	10
2.2 孔隙特征	11
2.3 储层物性特征	12
2.3.1 盒8上段储层物性	13
2.3.2 盒8下段储层物性	13
2.3.3 覆压物性特征	13
2.4 物性影响因素	16
2.4.1 岩性对物性的控制作用	17
2.4.2 成岩作用对物性的控制作用	17
2.4.3 沉积微相对物性的控制作用	19
2.5 小结	20
第3章 盒8段储层岩石物理参数特征	21
3.1 岩石弹性参量及其相互关系	21
3.2 地球物理响应特征	22
3.3 敏感性参数分析	25
3.4 岩石物理参数特征	26
3.4.1 岩芯速度测定	27
3.4.2 实验数据分析	27
3.4.3 方程验证	29
3.4.4 流体判别因子构建	31

3.5 小结	31
第4章 AVO 分析方法	33
4.1 Zoeppritz 方程	33
4.2 AVO 近似方法	35
4.2.1 Aki-Richards 近似	35
4.2.2 Shuey 近似	35
4.2.3 Smith-Gidlow 近似	37
4.2.4 Fatti 近似	37
4.2.5 Hiltermann 近似	38
4.2.6 Gray 近似	39
4.2.7 基于纵横波速度比和密度比的近似方法	39
4.2.8 AVO 正演方法对比	41
4.3 AVO 分析方法	43
4.3.1 Shuey 两项近似的属性应用	43
4.3.2 广义 AVO 属性分析	44
4.4 含气砂岩分类	51
4.4.1 I 类——高阻砂岩	51
4.4.2 II 类——阻抗差近于零的砂岩	52
4.4.3 III 类——低阻砂岩	52
4.4.4 IV 类——低阻砂岩	52
4.5 小结	53
第5章 岩石物理参数重构方法	54
5.1 弹性阻抗基本原理	54
5.1.1 弹性阻抗	54
5.1.2 横波弹性阻抗	56
5.1.3 转换波弹性阻抗	57
5.1.4 扩展弹性阻抗	58
5.2 纵波阻抗和横波阻抗的重构方法	59
5.2.1 重构方法一	59
5.2.2 重构方法二	60
5.2.3 重构方法三	60
5.2.4 改进的重构算法	61
5.3 理论模型测试	61
5.4 小结	67

第 6 章 苏五区块流体判别.....	68
6.1 理论模型分析	68
6.1.1 零相位 Ricker 子波	69
6.1.2 最小相位 Ricker 子波	70
6.1.3 统计子波	72
6.1.4 流体替换	73
6.1.5 实际资料正演	78
6.2 地球物理模型响应	80
6.2.1 顶部含气模型	81
6.2.2 底部含气模型	81
6.2.3 中部含气模型	81
6.2.4 多段含气模型	81
6.2.5 实际资料分析	85
6.3 苏五三维流体判别分析	86
6.3.1 资料品质分析	86
6.3.2 密度反演	90
6.3.3 振幅属性分析	92
6.3.4 AVO 分析	93
6.3.5 岩石物理参数重构	96
6.3.6 综合预测	100
6.4 小结	102
参考文献	103

第1章 绪 论

1.1 问题的提出

随着勘探程度不断深入,以低孔、低渗为特征的致密碎屑岩储层日益引起勘探界的关注。致密碎屑岩储层的最大特点是非均质性极强,油气富集不只与构造有关,更与致密背景下相对高孔、高渗储层的发育状况关系密切,且孔隙流体的性质、分布异常复杂,其判别方法更是一世界性难题。

致密碎屑岩储层的孔隙度和渗透率都低于常规储层,且一般埋藏较深、构造也相对平缓(王泽明, 2010),因而被划分到非常规天然气大类中。致密只是一个相对的概念,因资源状况和技术手段不同,不同国家、不同时期的划分标准亦有所不同。Spencer 将致密砂岩储层划分为高孔隙度致密砂岩储层和低孔隙度致密砂岩储层两大类。其中,高孔隙度致密砂岩储层为渗透率小于 0.1 mD 的粉砂岩(孔隙度 10%~30%)和细砂岩(孔隙度 20%~40%);而低孔隙度致密砂岩储层的孔隙度为 3%~12%,渗透率小于 0.1 mD(Spencer, 1985; 1989)。

致密含气砂岩的概念最早出现在美国,美国于 1978 年就在天然气政策法案中规定,砂岩储层的天然气渗透率小于 0.1 mD 的气藏才可以被定义为致密砂岩气藏;美国联邦能源委员会也把致密含气砂岩定义为空气渗透率小于 0.1 mD 的砂岩。关德师等(1995)则认为,致密砂岩气是指储层的孔隙度低($< 12\%$)、渗透率较低(< 1 mD)、含气饱和度低($< 60\%$)、含水饱和度高($> 40\%$)、天然气在其中流动较为缓慢的、砂岩中的非常规天然气。赵靖舟(2012)在对非常规油气概念进行系统分析的基础上,指出常规砂岩气和致密砂岩气均属于源外型非常规气藏,与常规砂岩气相比,致密砂岩气储层必须经过压裂才能获得经济产能,其物性表现为绝对渗透率低于 2 mD。结合国内外低渗透致密气藏的研究成果,赵靖舟将气藏按其渗透率分为三大类:①常规气藏,气层渗透率大于 10 mD;②低渗透气藏,气层渗透率 2~10 mD;③致密气藏,气层绝对渗透率小于 2 mD。总之,对于致密砂岩储层的界定,储层孔隙度的标准相差较大,而渗透率的划分标准却基本一致,都强调了致密砂岩储层的低渗透率特征。

勘探开发实践表明,中国天然气资源丰富,总资源量达 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,但品

位差异悬殊(王涛, 1997; 李剑, 等, 2001; 付金华, 等, 2001; 田昌炳, 等, 2003, 杨华, 等, 2012), 在已探明的天然气储量和尚未探明的剩余天然气资源中, 属高丰度、高效的天然气资源量约占总量的 $1/3$, 而低效资源量却占到了总量的 $2/3$ 。

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地中北部, 勘探面积约 $20\,000\text{ km}^2$, 天然气资源量约 $1.80 \times 10^{12}\text{ m}^3$, 预测储量 $1\,571.52 \times 10^8\text{ m}^3$, 是迄今为止中国石油天然气集团公司在陆上找到的面积最大、规模最大的低压、低渗、低丰度的砂岩岩性气藏。苏里格气田是低效致密砂岩气田的典型代表, 以低渗透率、低孔隙度、低丰度且强非均质性为特征, 且有效砂体叠置模式复杂、连通性差。目前, 已发现上古生界二叠系下石盒子组盒 7 段、盒 8 段、山西组山 1 段、山 2 段及下古生界奥陶系马家沟组马五段等多套含气层段, 其中, 盒 8 段、山 1 段的天然气勘探始于 1999 年, 2000 年油气勘探获得重大突破。自 2001 年苏五区块第 1 口探井——苏 5 井钻探成功以来, 先后钻探了苏 25-12、苏平 2 等 8 口井, 但获无阻流量 $1.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 以上的井仅有 5 口(含苏 5 井), 其他的均为微气(干)井或水井。截至 2009 年 5 月底, 苏五区块共完钻 179 口井, 按照中国石油长庆油田分公司的划分标准, I 类井 85 口, II 类井 64 口, I+II 类井占 83.2%, III 类井 30 口, 占 16.8%; 除主力产层盒 8 段之外, 纵向上还发现了盒 7 段、山 1 段、山 2 段和太原组气藏。

多年的勘探、研究成果表明, 苏五区块盒 8 段储层为处于潮湿沼泽背景下、距物源有一定距离的叠合砂质辫状河砂体, 有效储层以高能水道中的粗岩相心滩为主, 岩性及厚度空间变化大, 含水饱和度较高, 气水关系复杂。截至目前, 探索性的 AVO 分析和叠前弹性阻抗反演等流体检测工作取得了积极的阶段性成果, 但还难以有效识别含气富集区。因此, 探索、研究适合本区的流体判别方法至关重要。

1.2 国内外研究动态

地震勘探是利用地下介质弹性和密度的差异, 通过观测和分析大地对人工激发地震波的响应, 推断地下岩层的性质和形态, 其终极目标应该是根据炮域地震记录估算地下介质的岩石物理参数, 如纵波速度、横波速度、密度, 甚至各向异性参数(何樵登, 1988; Aki, et al., 1980; Yilmaz, 1987; Sheriff, 1991)。反射法地震勘探源于 1913 年前后 R. 费森登的工作, 1921 年, J. C. 卡彻在美国俄克拉荷马州首次记录到人工地震产生的、清晰的反射波, 之后, 反射法地震勘探进入工业化应用阶段。20 世纪 70 年代前, 地震勘探的主要目的就是查明地质构造的形态; 20 世纪 70 年代, 开始利用地震勘探研究岩性和岩石孔隙中所

含流体的性质,即根据地震时间剖面上的振幅异常来判定气藏的“亮点”分析,根据反射地震波振幅与炮检距(入射角)的关系来预测油气藏的 AVO 分析;20 世纪 80 年代,开始利用反射地震波振幅来推算地层的波阻抗和层速度,即叠后纵波阻抗反演,地震勘探从以构造勘探为主向岩性勘探的方向发展。

利用地震资料进行孔隙流体判别目前主要有两种方式:一种是利用多波、多分量地震记录中的转换横波信息研究介质的岩石物理参数特征,其优点显而易见,即转换横波携带着丰富的岩性信息,但其处理、解释方法目前仍处于探索、研究阶段,且要求投入的资金非常大;另一种是利用纵波地震资料中携带的隐含岩性信息研究介质的岩石物理参数特征,这就是常说的叠前反演(包括 AVO/AVA 和叠前弹性反演),也就是本书的主要研究内容。

地震属性(seismic attributes)是近十几年才提出的一个术语,广义来讲,叠前反演也应该纳入到地震属性研究中来。所谓地震属性(Michelena, et al., 1998; Marfurt, et al., 1998; Marfurt, et al., 1999; Gersztenkorn, et al., 1999a; Gersztenkorn, et al., 1999b; Brown, 1996; Bahorich, et al., 1995; Cohen, 1997),就是从地震数据中提取出的、能够反映储层特征或含油气性特征参数,如振幅、频率、相位、能量、波形、比率和相干性等,过去一般将其称为地震参数、地震特征、地震信息等(Leary, et al., 1988; Barnes, 1991, 1993; Jones, 2000; Matteucci, 1996; Mazzotti, 1991; Robertson, et al., 1988; Ronen, et al., 1994; Sheriff, 1991)。尽管地震属性是近十几年才提出的,但自 1920 年 Haseman 等应用地震勘探寻找油气以来,从最早利用双程反射时间寻找构造圈闭,到利用岩层的纵波阻抗寻找岩性圈闭,发展到目前利用多属性分析进行储层综合预测,地球物理学家在实际工作中一直在使用地震属性(Kalkomey, 1997; Russell, et al., 1997; An, et al., 2001; Hampson, et al., 2001; Chen, G., et al., 2008)。第 67 届地球物理年会会对地震属性进行了专题讨论,西方地球物理公司的 Chen 等(1997a)发表的《地震属性技术的进展》一文,介绍了当今世界地震属性技术的最新进展,此后,国际上统一采用“地震属性”一词。

作为地震储层预测的主要技术手段之一,到目前为止还没有一个较为完整的、统一的地震属性列表,这是因为不同的学者采用的分类角度不同,且不同的研究区对属性的敏感程度也不尽相同,更何况属性的提取种类还在不断创新和发展。Taner 等(1994)将地震属性分为物理属性和几何属性;Brown(1996)则按其定义和作用分为时间属性、振幅属性、频率属性和吸收属性等 4 类;Chen 等(1997a; 1997b)则按在地震剖面上的提取时窗性质分为基于层位的属性(平均属性)和基于样点的属性(瞬时属性)两大类,并对各种属性的提取方法、物理意义和应用范围做了全面总结,他所定义的各类属性超过 300 种。

叠前反演研究的是叠前振幅属性,是通过研究反射纵波振幅随偏移距(入射角)的变化规律来预测储层孔隙中所含流体的性质。由于不同的孔隙流体对地震波高频成分的吸收衰减亦有所差异,因此,也可以通过研究储层段的频率属性和吸收属性来定性预测储层的孔隙流体性质。叠前反演的核心是利用地震纵波信息研究其振幅随偏移距的变化,进而预测储层的含油气特征,其理论基础是描述平面纵波在界面上反射和投射能量的 Zoeppritz 方程。自 1961 年 Bortfeld 研究反射纵波的振幅随偏移距的变化规律开始(Bortfeld, 1961),特别是 20 世纪 90 年代以来,AVO 和叠前弹性反演技术快速发展,取得了丰富的研究成果。

1.2.1 AVO/AVA 技术

AVO(amplitude versus offset)技术是利用叠前共中心点道集资料(common midpoint point, CMP),严格来讲,应该是共反射点道集(common reflection point, CRP),即成像道集,来分析地震反射纵波振幅随偏移距的变化规律,进而估算界面两侧介质泊松比的变化、推断地层岩性和储层的含油气特征(殷八斤,等;印兴耀,2010;Shuey, 1985; Smith, et al., 1987; Rutherford, et al., 1989; Fatti, et al., 1994; Goodway, et al., 1997; Castagna, et al., 1998; Burianky, et al., 2000; Avseth, et al., 2001; Nowak, et al., 2008; Ursenbach, et al., 2008),其理论基础是描述平面波在水平界面上反射和透射的 Zoeppritz 方程。

本质上,AVO 研究的是地震反射纵波振幅随入射角的变化规律,即 AVA(amplitude versus incident angle)。自 Koefoed 计算单个反射界面上反射系数随入射角的变化开始(Koefoed, et al., 1980),为了克服由 Zoeppritz 方程导出的反射系数形式复杂,且不易进行数值计算的困难,诸多学者对 Zoeppritz 方程进行了简化。

Aki 等(1980)给出了以速度和密度的相对变化率表示的纵波反射系数。

在 Aki 近似的基础上,Shuey(1985)给出了体现泊松比对纵波反射系数影响的近似,并首次提出了纵波反射系数的 AVO 截距和 AVO 梯度的概念,证明了相对反射系数随炮检距的变化梯度主要由泊松比的变化来决定,他的研究奠定了 AVO 处理的基础,并使 AVO 技术开始成为一项实用的地震技术以预测储层的含油气特征。

Smith 等(1987)提出的 CMP 道集加权叠加的 AVO 反演方法将加权叠加技术应用用于岩性参数的估计,并对纵波速度变化率和横波速度变化率进行了分离,且不受纵横波速度比近于 2 这一假设条件的限制,为 AVO 技术的进一步发展提供了广阔思路。虽然该近似方法能够较为精确地反演岩性参数,可以给出较大角度(小于临界角)下较为精确的纵波反射系数,但速度和密度指数

关系式的引入在很大程度上限制了其应用范围,特别是经验关系式与实际相差较大时,方程的解可能不收敛甚至无解,同时很可能引入小角度误差,而且,该近似只能从得到的相对参数变化来对岩性作定性分析,并需要速度相对变化率这一背景信息。

Mallick 等(1993)提出用流体因子及射线参数来近似表达纵波反射系数。

Fatti 等(1994)提出了波阻抗变化率近似,该方法虽然没有小角度入射的限制,可以较准确地应用于入射角小于临界角的情形,但利用该方法进行参数反演时,需要垂直入射的纵波反射系数和横波反射系数。

Goodway 等提出的拉梅常数分析方法突出了弹性参量对纵波反射振幅的影响,认为利用弹性模量交会图不仅可以有效地提取岩性信息,而且可以更敏感地区分孔隙中所含流体的性质(Goodway, et al., 1997; Goodway, 2001)。

国内一些地球物理学者,如郑晓东、杨绍国、杨慧珠、李正文等就 AVO 技术开展了众多研究工作(郑晓东, 1991; 杨绍国, 等, 1994; 杨慧珠, 等, 1996; 李正文, 等, 1996), 为该项技术在中国的发展起到了积极的推动作用。

杨绍国等(1994)从 Zoeppritz 方程出发,对转换波和转换横波的奇偶性作了更一般性的证明,并推导出了 Zoeppritz 方程的级数表达式,进而可以得到任意精度的 Zoeppritz 方程近似表达式。

杨慧珠等(1996)从精确的 P-SV 波反射系数公式出发,推导出了作为射线参数函数的近似公式,说明在非法线入射时 P-SV 波的反射系数主要取决于两个弹性参数:① 反射界面两侧介质体密度之差与平均体密度之比($\Delta\rho/\rho$); ② 反射界面两侧切变模量差与平均体密度之比($\Delta\mu/\rho$)。

阴可等(1998)讨论了两种各向异性介质中存在水平界面时的反射系数近似式,并将 Delay 等推导的横向各向同性介质中的反射系数公式推广到方位各向异性介质的主轴方向上。

许多等(2001)以 Shuey 近似方程为基础,用改进的 Marquart 方法来反演某海上资料目的层的泊松比及界面两侧的泊松比差。

孙鹏远等(2003; 2006)对 Zoeppritz 方程所描述的 P-SV 波的反射系数公式的角度项进行了泰勒展开,并保留了密度和速度的二阶项,得到了一个新的反射系数近似公式,对 4 个三层含气砂岩模型的定量计算表明,该近似公式在入射角小于 40° 时的计算结果与由 Zoeppritz 方程给出的精确解吻合很好,因此,适合大入射角的 AVO 参数反演和理论研究。

谢用良(2006)利用川西丰谷三维宽方位地震资料,通过测井数据的岩石物理特征分析、已知井的 AVO 模型正演、流体替换和交会图分析,认为在川西丰谷三维地震资料偏移距范围内,含气砂岩与含水砂岩的测井岩石物理特征存在明显的差异,储层砂体中气、水等流体的变化可以导致不同的 AVO 异常。

如今, AVO 技术, 包括 AVO 反演、AVO 属性交会、 $\lambda - \mu - \rho$ (LMR) 分析和流体因子已经或正在渗透到地震勘探的其他领域, 如利用 AVO 资料反演岩石的弹性参数、预测裂缝发育带、进行流体检测等, 展示了该项技术广阔的应用前景。转换波和多波 AVO、AVO 与叠后属性结合、三维 AVO 分析与解释技术等是当今 AVO 技术的研究热点和发展趋势。

1.2.2 弹性波阻抗技术

1999 年, Connolly 发表了有关弹性波阻抗的论文 (Connolly, 1999), 从此掀起了弹性波阻抗反演研究的热潮 (曹孟起, 等, 2006; 马劲风, 2003; 印兴耀, 等, 2004; 王保丽, 等, 2005)。

众所周知, 近偏移距的纵波振幅与纵波阻抗具有相关性, 因此, 把近偏移距地震记录与测井资料联系起来, 就可以得到基于声波阻抗 (acoustic impedance) 的、在某种程度上能将其变换到叠后反演算法的波阻抗。对于远偏移距, 则需通过弹性波阻抗 (elastic impedance) 函数来恢复。弹性波阻抗是声波阻抗的推广, 它是纵波速度、横波速度、密度以及入射角的函数。弹性波阻抗使 AVO/AVA 信息通过一种让非地球物理学家能直观理解的方式显示出来, 弹性波阻抗包含了 AVO/AVA 信息, 与声波阻抗一起应用可提高岩性判别的能力, 弹性波阻抗与声波阻抗的结合可能成为新一代的多数据体解释方法。

马劲风 (2003) 认为, 广义弹性阻抗反演较常规地震反演能提供更多、更可靠的流体、孔隙度、砂泥质含量等信息, 有助于解释常规地震反演和道积分剖面中的假象, 降低反演的多解性, 提高储层预测精度。

孟宪军等 (2004) 通过研究认为, 在岩石地球物理模型、测井数据及构造模型约束下, 通过针对性的地震标定、子波估算, 可以有效降低单纯纵波弹性阻抗反演的非唯一性。

王保丽等 (2005) 认为, 角度部分叠加资料保留了地震波的许多 AVO/AVA 特征, 弹性阻抗反演成果将给岩性参数 (纵波速度、横波速度、密度、纵波阻抗、横波阻抗、泊松比等) 的提取提供可能性, 弹性阻抗反演得到的弹性阻抗中蕴含着丰富的 AVO/AVA 信息。

苑书金等认为, 叠前地震反演可以克服叠后地震反演储层信息量的不足, 具有良好的保真性和多信息性, 能够提供丰富的储层参数信息, 叠前地震反演不但能给出波阻抗信息, 还能提供纵横波速度比、泊松比等反映储层物性、孔隙流体特征的储层参数, 可以更可靠地揭示地下储层的展布特征和含油气性 (苑书金, 等, 2005; 苑书金, 2007)。

彭真明等 (2007) 以各向异性介质理论为基础, 利用多波 AVA 资料进行了多方式的反演, 增加了约束条件, 减少了反演的多解性, 得到了更为可靠的横

波速度、纵波速度、地层密度和各向异性参数等重要的地层岩性参数。

在含气饱和度预测方面, Wandler 等(2007)通过物理模拟研究表明, 利用 AVO 梯度和 AVO 截距分析可以区分孔隙流体类型, 但不能有效区分压力变化; Mavko 等(1998)则认为孔隙中的流体分散分布时的纵波速度较均匀分布时要大的多; Gomez 等(2007)的研究表明, 在流体均匀分布情况下, 非常低的含气饱和度与饱和气时的地震响应是相同的; Mallick 等(2006)则认为, 密度变化对区分商业气藏与非商业气藏非常重要, 而密度、纵波的阻抗(速度)及横波的阻抗(速度)变化对于岩性识别异常重要。

1.2.3 下二叠统盒 8 段储层地震预测

针对苏里格气田下二叠统下石盒子组盒 8 段储层地震预测、AVO/AVA 及弹性反演进行流体检测, 中国石油川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司(原四川石油管理局地球物理勘探公司)、长庆油田分公司勘探开发研究院及东方地球物理公司多年来开展了大量细致的研究工作, 取得了积极的研究进展。

魏红红等(1998)将鄂尔多斯盆地山西组储集空间归纳为大孔粗喉型、大孔细喉型、小孔细喉型和细孔微喉型等 4 类。

樊太亮等(1999)在层序地层构架研究基础上, 通过基准面旋回、古地貌格局及其演变分析, 认为石盒子组发育 4 支河道体系。

曹敬华等(2001)从储层物性特征研究出发, 认为盒 3 段储渗性能最好, 其次是盒 1 段, 盒 2 段最差。

王大兴等(2001)通过研究认为, 鄂尔多斯盆地山西组砂岩气藏为具有低孔隙度、低渗透率和高阻抗特征的岩性气藏, 常规岩性解释很难区分含气砂岩和致密砂岩, 而利用不同岩性的泊松比差异所形成的 AVO/AVA 响应特征, 可以有效地区分地震高波阻抗层的岩性及含气性。

何顺利等(2005)根据岩石学、沉积学及沉积期古气候特征建立了苏里格气田储层的沉积模式, 认为盒 8 期、山 1 期发育废弃河道、决口扇以及泛滥平原, 使得储层砂体的隔层、夹层发育。

刘喜武等(2005)认为, 无井递归反演可验证层位解释的正确性、建立较准确的地震地质模型, 稀疏波阻抗反演的纵向分辨率不能满足精细储层预测的要求, 而采用序贯高斯配置协模拟方法可得到泥质含量、孔隙度和原始含水饱和度和等物性参数。

曹孟起等(2006)通过研究认为, 苏里格地区盒 8 段含气砂岩表现为纵波阻抗低、泊松比低、纵横波速度比低, 但横波阻抗高, 不含气砂岩则表现为纵波阻抗、横波阻抗、泊松比、纵横波速度均高。

武丽等(2005)利用地震属性分析技术研究了苏里格地区地层的沉积规律和有利相带,认为利用地震属性分析可有效地预测主要目的层段的砂层组分布及其厚度,地震、测井联合反演能将地震和测井有机地融合起来,可以突破传统意义上的地震分辨率限制,提高地震资料的纵向分辨能力,是薄层砂体识别和含气性预测的关键技术。

唐海发等(2007)通过研究认为,盒二段储层属于辫状河沉积体系,沉积微相在宏观上控制了储层物性的空间分布,辫状河主河道微相的物性最好。

王香文等(2006)采用精细层位标定、精细断层识别、高精度变速建模、地震属性分析、AVO/AVA 油气检测、精细高分辨率井约束反演等落实了局部低幅度构造圈闭,识别了断层,消除了速度陷阱带来的假构造现象。

文华国等(2007)认为,苏6井区盒8段属河流沉积体系,其中盒8下段为辫状河,盒8上段为曲流河,在深入细致的微相分析基础上,建立了缓坡型辫状河与多河道低弯度曲流河沉积模式,认为最有利的储集砂体为高能水道心滩和边滩叠置砂体。

苑书金等对多个叠前角道集数据体实施联合约束稀疏尖脉冲反演,可同时得纵波阻抗、横波阻抗和密度等3个数据体,进而提取岩石弹性参数,再将AVO/AVA 属性参数集联合用于精细储层描述,提高了岩性识别和流体判别的精度(苑书金,等,2005;苑书金,2007)。

王霞等(2011)利用 Greenberg-Castagna 模型,利用迭代法把原来的地层水替换成油和气,经过精细测井解释,建立了纵横波速度比-纵波阻抗交会分析图版,通过分析多种属性与储层含油性的关系,给出了1种能够指示储层及含油饱和度特征的属性——储层流体属性。

1.3 主要研究内容与关键技术

针对致密碎屑岩储层的特点,选择特征井,通过岩石薄片分析,研究目的层段的孔、渗结构并最终确定其有效孔隙度;实验室测定各类含气储层的岩石物理参数特征(纵波速度、横波速度及密度),得到其纵横波速度比,结合声波测井资料分析其 AVO/AVA 响应,研究其 AVO/AVA 属性特征;利用井旁地震记录研究典型储层的叠后属性,研究富含气砂岩的敏感属性;通过叠前弹性反演得到目的层段的纵波速度、横波速度以及密度,结合富含气岩芯的岩石物理参数特征优选或构建表征富含气砂岩的参量或参量对。具体流程见图1.1。

1.3.1 主要研究内容

(1) 孔、渗结构研究:选择典型井岩芯资料进行扫描电镜、铸体薄片分析,

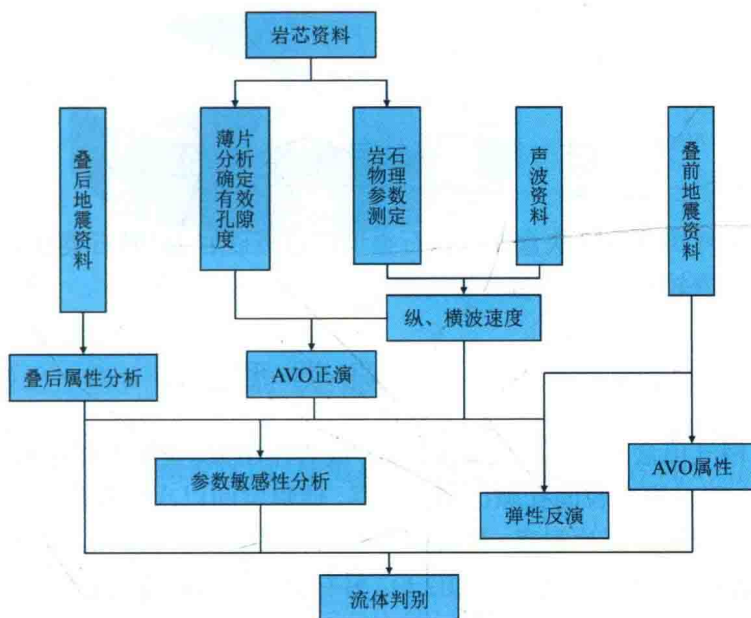


图 1.1 研究思路框图

总结储层的孔、渗结构,进行覆压条件下岩样的孔、渗分析,确定储层段的有效孔隙度。

(2) 储层段岩石物理参数实验室测定:选择典型井岩芯,在地层压力条件下进行不同含气饱和度(0, 50%, 100%)条件下砂岩样品的岩石物理参数(纵波速度、横波速度、密度)测定,构建适用于致密碎屑岩储层的流体判别因子。

(3) 储层段含气砂岩 AVO 响应特征研究:分析目前 AVO 近似方法及其适用性条件,研究适用于致密碎屑岩储层的 AVO 分析方法。

(4) 叠前反演研究:分析目前常用的纵波阻抗和横波阻抗的重构方法及其适用性条件,研究适用于致密碎屑岩储层的、不依赖速度比假设的纵波速度、横波速度和密度的重构方法。

(5) 敏感性参数分析:利用波列测井资料研究气水敏感参数。

1.3.2 关键技术

(1) 非线性的 AVO 分析技术。

(2) 不依赖速度比假设的纵波速度、横波速度和密度重构技术。

第2章 储层物性特征

苏里格气田苏五区块盒8段岩石类型以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主,且岩石粒度普遍较粗,以中-粗砂岩为主。

2.1 孔隙类型

苏里格气田盒8段储层埋藏深度大,成岩作用强,受压实作用和胶结作用的影响,大部分原生粒间孔隙已消失殆尽,储集空间以次生孔隙为主,属于孔隙型储层。据铸体薄片观察,孔隙类型主要有原生残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔、杂基内微孔等(图2.1),另有少量的微裂缝、泥质收缩缝、粒内破裂缝等^①。

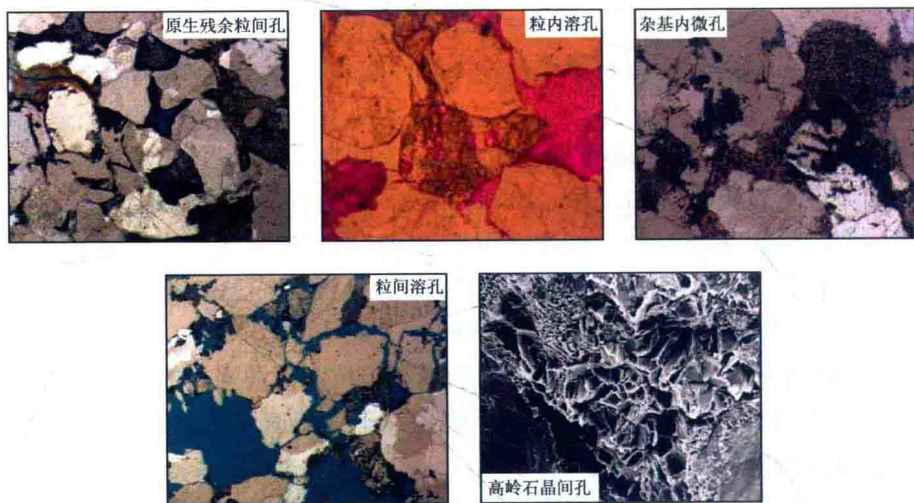


图 2.1 苏 5-1 井下石盒子组铸体薄片

1. 原生残余粒间孔

原生孔是指沉积物颗粒之间存在的孔隙,而压实作用导致颗粒排列发生改变或塑性颗粒变形使原生粒间孔体积缩小,胶结作用使得孔隙被不同程度地充填一些成岩矿物而进一步造成粒间孔隙缩小,连通性变差,充填的结果常使孔隙呈缝状残留(丁晓琪,等,2011;樊爱萍,等,2011)。研究区内这类孔隙的孔径一般为 $0.03 \sim 0.06 \mu\text{m}$,在总孔隙中所占比例仅为 8.70%(图2.2)。

^① 常压孔、渗测试分析资料引自中国石油川庆钻探工程有限公司。