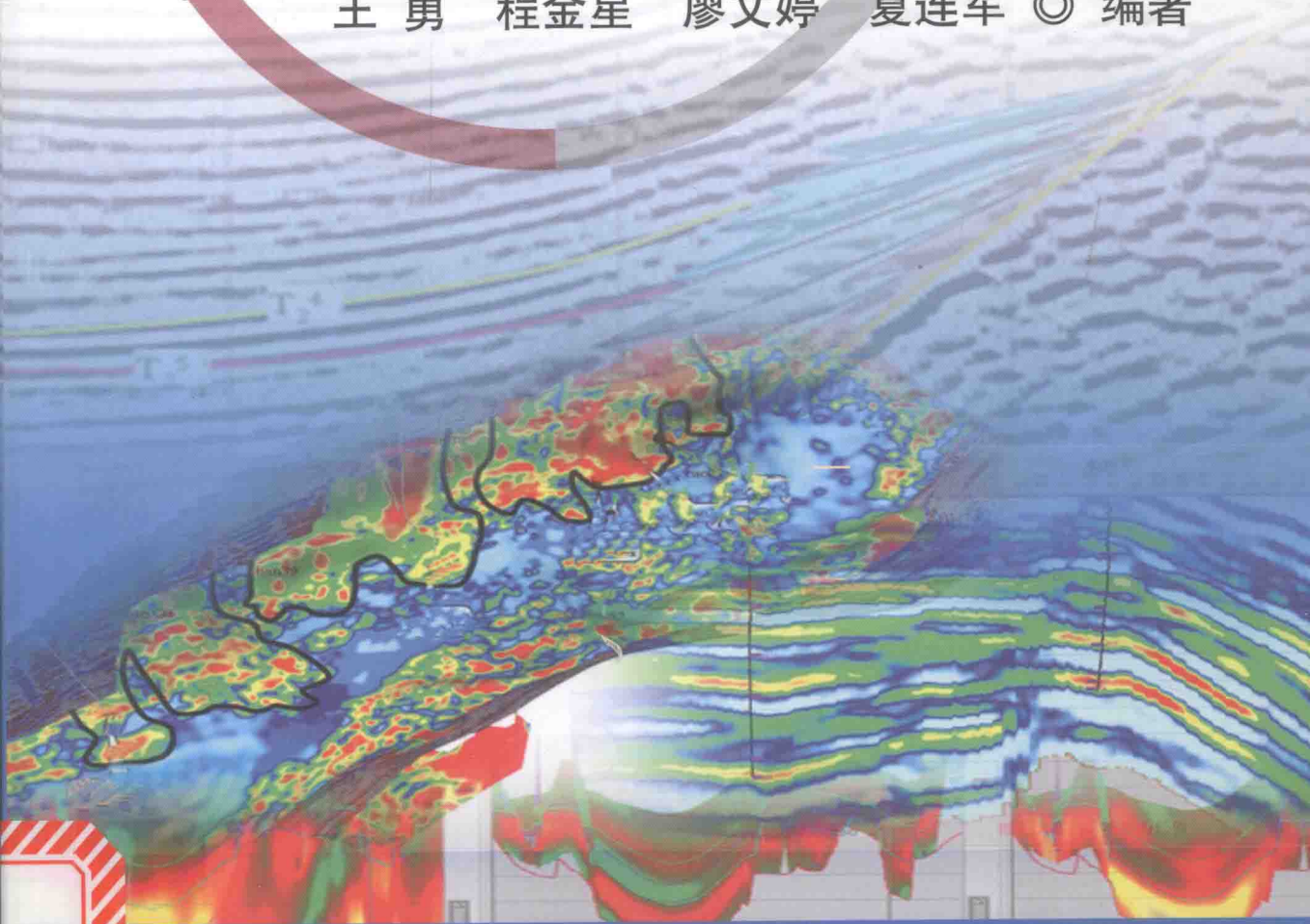




地震资料 在隐蔽圈闭 识别中的应用

王 勇 程金星 廖文婷 夏连军 © 编著



石油工业出版社

地震资料在隐蔽圈闭识别中的应用

王 勇 程金星 廖文婷 夏连军 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书围绕岩石物理这一核心问题,从理论模型研究到实测数据分析,再到特征成因总结,明确了苏北盆地不同类型陆相沉积砂岩在岩石物理上的共性与特性,并结合地震正演研究了储层参数和地震响应之间的关系。在此基础上,对症下药,针对不同地质目标,灵活运用地震属性分析、测井约束反演、叠前同时反演、地质统计分析等技术,开展隐蔽圈闭识别和勘探实践,取得了丰富的研究成果和较高的勘探效益。

本书可供油气田勘探科技人员及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地震资料在隐蔽圈闭识别中的应用/王勇等编著.
北京:石油工业出版社,2015.4

ISBN 978-7-5183-0655-8

I. 地…

II. 王…

III. 地震资料处理-应用-岩性圈闭-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 035824 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.com

编辑部:(010) 64523533 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9.5

字数:250 千字

定价:98.00 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



前言

Preface

随着油气田勘探开发工作的不断深入,研究对象已由传统的构造型油气藏向地震识别难度较大的隐蔽油气藏转变,其研究工作对三维地震勘探的依赖程度越来越大,对地震资料分析技术的要求也越来越高。如何充分挖掘地震资料中隐含的地质信息,满足隐蔽油气藏勘探开发的需要,是近年来地震资料分析技术应用研究的首要任务。《地震资料在隐蔽圈闭识别中的应用》是为适应这一需求,在苏北盆地隐蔽油气藏勘探实践经验总结的基础上编写而成的。

书中涉及的隐蔽油藏类型和实例主要取自苏北盆地高邮凹陷戴南组、海安凹陷泰州组和金湖凹陷阜二段,岩性以砂岩为主。高邮、金湖凹陷是江苏油田主力产油区,海安凹陷泰州组勘探程度也颇高,历经几十年勘探开发,已积累了大量的井筒资料、齐备的三维地震资料和丰富的地质认识,为开展隐蔽油气藏勘探奠定了充实的研究基础。

“十一五”以来,江苏油田针对隐蔽油气藏进行了大量科研攻关和勘探实践,在系统的层序地层、沉积微相研究和油藏评价的基础上,明确了隐蔽油气藏的主要类型、分布及成藏有利区带,并将高邮凹陷戴南组陡坡带“扇控型”圈闭和缓坡带构造—岩性圈闭、海安凹陷泰州组构造—岩性和地层超覆圈闭作为重点勘探对象。

与海相沉积的低速砂岩不同，苏北盆地陆相沉积的砂岩为相对高速、高阻抗特征，砂岩预测面临四大难题：（1）砂泥岩薄互层问题；（2）有效砂岩的速度、波阻抗介于泥岩与干层之间；（3）埋深跨度、储层物性和黏土含量变化等因素引起的砂岩与泥岩速度、波阻抗叠置问题；（4）多套勘探层系夹有高速泥岩、灰质岩，与薄砂层在岩石物理和地震响应上难区分。对此，书中围绕岩石物理这一核心问题，从理论模型研究到实测数据分析再到特征成因总结，明确了苏北陆相沉积砂岩在岩石物理上的共性与特性，并结合地震正演研究了储层参数和地震响应之间的关系。在此基础上，对症下药，针对不同研究目标选择适合的地震资料分析技术进行隐蔽圈闭识别，取得了丰富的研究成果和较高的勘探效益。通过对地震属性分析、测井约束反演、叠前同时反演、地质统计分析等技术的灵活运用，实现了永38、花26、邵20、堡5、肖14、曹65等一批隐蔽油藏勘探发现和突破。

在项目研究和本书编写过程中，刘洋教授给予了大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。由于篇幅和图件尺寸限制，书中仅附关键图件。受笔者水平所限，编写过程中难免出现不当之处，敬请读者批评指正。

目 录

Contents

1 绪论	(1)
1.1 隐蔽油气藏勘探现状	(1)
1.2 隐蔽圈闭地震识别技术现状	(1)
2 隐蔽油气藏	(4)
2.1 隐蔽油气藏的概念	(4)
2.2 隐蔽油气藏的分类	(5)
2.3 隐蔽油气藏亚类特征	(6)
3 岩石物理基础	(8)
3.1 岩石物理研究目的	(8)
3.2 岩石物理模型	(8)
3.3 岩石物理应用研究	(17)
4 地震属性分析技术	(20)
4.1 地震属性的发展历程	(20)
4.2 地震属性的分类及描述	(21)
4.3 地震属性的提取	(26)
4.4 地震属性的优化	(27)
4.5 地震属性储层预测	(31)
5 地震反演技术	(36)
5.1 地震反演简介	(36)
5.2 叠后地震反演	(37)
5.3 叠前地震反演	(43)
6 地震资料在苏北盆地隐蔽圈闭识别中的应用实例	(54)
6.1 苏北盆地隐蔽圈闭的主要类型及特征	(54)

6.2	地震资料在高邮凹陷缓坡带隐蔽圈闭识别中的应用	(64)
6.3	地震资料在高邮凹陷南部陡坡带隐蔽圈闭识别中的应用	(84)
6.4	地震资料在金湖凹陷西斜坡储层预测中的应用	(106)
6.5	地震资料在海安凹陷泰一段隐蔽圈闭识别中的应用	(117)
后记		(138)
参考文献		(140)

1 绪 论

1.1 隐蔽油气藏勘探现状

随着人类对油气依赖程度的日益增强和对油气资源勘探开发的不断深入,相对简单的构造型油气藏勘探已进入中后期,世界油气资源开始出现稀缺现象,因此如何寻找隐蔽性较强的非构造油气藏已成为石油勘探的工作重点。自1966年A. I. Levorsen提出隐蔽圈闭(subtle trap)的概念以来,世界各国都加强了针对隐蔽圈闭的油气勘探研究,经过几十年的发展,相关勘探理论和方法技术都取得了很大的发展。研究表明,隐蔽圈闭含有全球约50%的油气,勘探潜力大,前景广阔。尽管难度很大,但勘探研究意义重大。

1982年,M. T. Halbouty在第66届AAPG年会隐蔽油气藏专题讨论的基础上,出版了《寻找隐蔽油气藏》专著。以此为标志,全球隐蔽油气藏勘探研究步伐加快。国外在进行隐蔽油气藏勘探方面效果显著。统计数据表明,对于勘探成熟的老油田,区内隐蔽圈闭的油气探明储量通常可达该油田总探明储量的1/3以上,例如,美国俄克拉荷马州的岩性—地层圈闭油气藏在近100年勘探发现统计中的占比为62%。世界范围内发现的隐蔽油气藏的数量在迅速增加,据专家预测,最终隐蔽油气藏占比将不小于1/2。

目前,我国油气勘探已进入针对隐蔽型油气藏的新时代,在理论研究方面,结合我国陆相生油的特点,有针对性地系统总结陆相断陷盆地隐蔽型油气藏形成机制,为隐蔽油气藏勘探的成功奠定了理论基础;在勘探实践方面,近几年来,国内隐蔽型油气藏的发现比例也在逐年增加。统计数据表明,我国东部老油田隐蔽圈闭的年均探明储量占比可达60%~70%;在中西部探区,如塔里木盆地和鄂尔多斯盆地等隐蔽圈闭油气探明储量的占比也在大幅提升。此外,在西部一些勘探程度相对较低的区域,由于沉积演化史和油气运移规律的复杂性,局部构造不发育,因此寻找隐蔽油气藏具有非常重要的意义。

总之,隐蔽油气藏已成为高成熟探区二次勘探、发现储量的重点领域。

1.2 隐蔽圈闭地震识别技术现状

隐蔽圈闭一般都具有边界条件复杂、形态不规则的特点,其赋存状态的隐蔽性决定了用传统勘探方法将难以准确识别。现实需求推动技术进步,近年来,隐蔽油气藏勘探的研究已取得了长足进步,主要体现在5个方面:(1)高分辨率层序地层学理论及其技术方法;(2)高分辨率三维地震资料采集及处理技术;(3)地震储层预测技术;(4)隐蔽圈闭综合评价技术;(5)特殊的钻井、测井和压裂改造工艺。在这五大技术体系中,地震储层预测是隐蔽圈闭识别中最为关键的环节^[1]。



地震储层预测技术可分为岩性预测技术和含油气性预测技术两个方面，不同类型的隐蔽油气藏地质条件和储层条件各不相同，相应的地震响应特征也不同，因此选用的勘探方法和预测技术也不相同，必须根据实际情况，具体问题具体分析。

利用地震资料分析技术和相关属性参数来进行储层预测的方法最早是从 20 世纪 60 年代开始的。起初，人们发现可以利用一些地震参数（如纵横波速度、密度和反射系数等）来直接识别油气异常。到了 20 世纪 70 年代，人们开始引入亮点技术和平点技术的概念，利用比较容易获得的三瞬参数、波阻抗参数、泊松比参数和横向各向同性参数进行油气检测。进入 20 世纪 80 年代，吸收系数、非品质因素、各向异性、AVO 等技术在直接油气识别中发挥了作用。从 20 世纪 90 年代至今，越来越多的技术理论和属性参数（灰色理论、分形分维和小波域中的各种参数）在油气检测中得到成功应用。

随着三维地震的发展，近十几年来，各类地震反演技术快速发展和推广应用，为各大油田的隐蔽圈闭识别提供了强有力的技术支持。隐蔽油气藏拓展勘探有利区带确定之后，在岩石物理特征分析的基础上，针对不同储层类型的砂体，开展地震储层预测方法攻关，可以识别隐蔽圈闭目标，完成隐蔽油气藏的定量描述，实现在空间上多砂体叠合的隐蔽圈闭的精确定位，为井位部署提供有效依据。

隐蔽圈闭识别的地震资料分析技术尚处发展过程中，国内外还没有系统的分类方案，要想归纳齐全也不是一项容易的工作。依据地震资料要求、算法和技术特点等，这里将与隐蔽圈闭识别有关的地震资料分析技术分为地震属性分析技术和地震反演技术两大类（表 1-2-1）。

表 1-2-1 常用于隐蔽圈闭识别的地震资料分析技术分类

分 类		技 术 特 点	适用范围	资料要求	
地震属性分析	叠后资料	多属性聚类分析	利用经验或数学方法进行属性优选，从不同角度反映储层特征，提高地震储层预测精度	定性识别岩性	低
		井震联合属性分析	振幅（能量）类属性反映岩性横向变化，与储层厚度、物性参数具有一定相关性	多井地区砂岩厚度、物性预测	
		波形分析	直接由地震波形预测储层厚度。如基于小样本学习理论的支持向量机（SVM）方法	多井地区储层预测	
		谱分解技术	根据离散傅氏变换或最大熵值变换将地震数据从时间域转换到频率域，获得不同频率的振幅谱或相位谱，对地震资料进行分析	薄层定量预测	高

续表

分 类			技 术 特 点	适 用 范 围	资 料 要 求
地震反演	叠后	道积分反演	不利用井孔信息, 分辨率低	少井或无井的新区	低
		递推反演	地震数据驱动, 井孔信息少, 分辨率低	少井或无井; 大套地层或特殊岩性	
		测井约束反演	不利用 AVO 信息, 具有多解性	纵波阻抗对储层有较好的识别能力	
		多参数岩性反演	利用 GR、RES 测井信息进行反演, 拓宽了测井和地震结合的领域, 但物理意义尚不明确	多井地区薄储层预测	
	叠前	AVO 烃类检测	利用 AVO 信息, 定性流体预测	岩性与流体识别	高
		弹性波阻抗反演	利用 AVO 信息, 半定量预测, 结果稳定性一般	储层与围岩纵波阻抗叠置	
		叠前同时反演	利用 AVO 信息, 岩性和流体定量预测, 结果稳定	储层与围岩纵波阻抗叠置	
		地质统计学反演	结合测井数据的纵向分辨率和地震的横向分辨率进行储层空间分布预测	油田开发阶段薄互储层预测	

2 隐蔽油气藏

2.1 隐蔽油气藏的概念

隐蔽圈闭是油气勘探范畴的术语,是形成隐蔽油气藏的必要条件,业内通常将隐蔽圈闭和隐蔽油气藏作为同一对象进行研究。随着勘探方法和技术水平的不断进步,隐蔽圈闭(油气藏)的概念也是不断变化的。

隐蔽圈闭(油气藏)的相关概念最早是由 J. F. Carll (1880)^[2]提出来的,他认为非构造因素也可以形成圈闭,其灵感来源于当时寻找背斜油气藏过程中较难识别和发现的非背斜油气藏。世界首例非背斜油气藏发现于 1919 年。1934 年, W. B. Wilson 在研究油气藏分类中提出了非构造圈闭(nonstructural trap)是“由于岩石物性变化而形成的储集层”的观点^[3]。1936 年, A. I. Levorsen 在其论文《地层型油田》中提出了“地层圈闭(stratigraphic trap)”的概念,指出地层岩性变化是该类油气成藏的主控因素^[4]。1964 年, A. I. Levorsen 又提出了“隐蔽圈闭(subtle trap)”一词,用来描述由构造、地层、流体(水动力)多要素组合的复合圈闭,并于两年后在 AAPG Bulletin 发表论文《隐蔽和难以捉摸的圈闭》(the obscure and subtle trap),文中详细论述了对隐蔽圈闭的新认识,并分析了 subtle trap 和 combination trap 的区别:combination 有结合、组合的意思,combination trap 这一术语完全可以用来表示由不同要素结合的复合圈闭,而 subtle 表示精细的、敏感的,用 subtle trap 表示复合圈闭没有根据^[5,6]。1972 年, M. T. Halbouty 重新启用 subtle trap 这一术语,用来表示勘探难度较大、区别于构造圈闭的不整合圈闭、地层圈闭和古地貌圈闭。1982 年, M. T. Halbouty 在他主编的有关隐蔽圈闭的专题报告集中,进一步明确了用 subtle trap 表示隐蔽圈闭的指代范围^[7]。同年, C. H. Savit (1982)撰文将当时勘探方法难以圈定位置的圈闭统称为隐蔽圈闭。

1984 年,我国地质学家朱夏指出隐蔽圈闭的含义虽然着重于一般意义上的非构造圈闭,但不排斥某些构造圈闭^[8]。鉴于隐蔽油气藏勘探对象比较宽泛,概念比较模糊的特点,国外目前已很少使用这一术语。国内对隐蔽油气藏的概念主要有两种理解:第一种沿袭 A. I. Levorsen 的观点,认为隐蔽油气藏等同于非构造圈闭油气藏;第二种认同朱夏院士的观点,拓宽了隐蔽油气藏的范围,认为隐蔽油气藏不仅包括非构造油气藏,还应该包括某些特殊的构造油气藏^[9]。

由于勘探理论、技术手段及勘探经验的差异,在不同国家和地区,隐蔽圈闭(油气藏)的涵义也会不同。同一国家和地区的不同时期,随着理论的发展和技术的进步,相关概念也会发生变化。1984 年,张万选在其《关于“隐蔽圈闭(油气藏)”的概念》一文中指出:从油气藏分类的科学角度来看,现在使用的隐蔽圈闭(油气藏)的术语是没有必要的,但从字面意思表示勘探难度大、成功率低等含义还是可取的^[10]。同年 5 月,陈荣书在讨论隐蔽圈

闭（油气藏）概念时建议采用构造、地层、流体及复合圈闭的分类系统来命名圈闭^[11]。2003年9月，贾承造院士在杭州勘探技术交流会上正式提出了用“岩性地层油气藏”取代“隐蔽油气藏”的观点，并进一步将岩性地层圈闭的概念定义为在一定构造背景下，通过沉积成岩及火山等作用形成的非构造圈闭，包括岩性圈闭、地层圈闭和构造—岩性复合圈闭。

2.2 隐蔽油气藏的分类

隐蔽油气藏分类的问题是伴随隐蔽圈闭定义的差异发展起来的，根据认识水平的不同，国内外学者给出的定义归纳起来分为3种：（1）广义上的地层圈闭，包括狭义的地层圈闭、不整合圈闭以及古地貌圈闭；（2）与构造圈闭相对应的所有非构造圈闭；（3）强调隐蔽性，指一切难以识别和发现的圈闭^[12]。

针对我国特殊的沉积特征，国内学者对隐蔽圈闭的定义归纳起来分为两种：（1）隐蔽圈闭等同于非构造圈闭；（2）隐蔽圈闭除了非构造圈闭外，还应该包括某些特殊的构造圈闭^[9]。

国内众多学者对隐蔽油气藏的分类问题进行了总结、探讨和研究^[9,13-17]。本书在参考前人研究成果的基础上，认为隐蔽油气藏应该在强调隐蔽性的基础上，从圈闭成因入手进行定义和分类（表2-2-1），即隐蔽油气藏包括非构造油气藏和难以识别和发现的复杂构造油气藏，其中非构造油气藏主要指的是岩性油气藏和地层油气藏，两者又可以根据成因进行细分。从分类的科学性和实用性角度考虑^[18]，将由多种成因控制的复合油气藏单独作为一类。水动力和稠油等流体油气藏的成藏条件需要构造因素配合，故将其归为复合油气藏类别。随着技术水平的进步和勘探理论的完善，隐蔽油气藏的定义和分类也相应地发生调整，这是一个变化的过程。

表 2-2-1 隐蔽圈闭的分类

大 类		亚 类
非构造圈闭	岩性圈闭	岩性上倾尖灭型
		透镜状岩性型
		生物礁块型
		成岩封闭型
		特殊岩性体型
	地层圈闭	地层不整合型
		地层超覆型
		古潜山型
	复杂构造圈闭	复杂背斜型
		复杂断块型
		低幅构造型（如微裂缝型）
复合圈闭		断层—地层型
		岩性—地层型
		构造—岩性型
		断层—岩性型
		构造—水动力型



2.3 隐蔽油气藏亚类特征

本书将隐蔽油气藏分为非构造油气藏、复杂构造油气藏和复合油气藏 3 类,其中非构造油气藏主要指的是岩性油气藏和地层油气藏。各类油气藏基于成因又可以进行亚类细分。为方便介绍,从岩性油气藏、地层油气藏、复杂构造油气藏和复合油气藏 4 个方面进行隐蔽油气藏亚类特征介绍。

2.3.1 岩性油气藏

岩性油气藏主要是指由于储层岩性岩相发生突变而形成的油气藏,一般受不同沉积环境影响,既可以在沉积过程中形成,又可以在成岩过程中形成,主要分为 5 个亚类^[9,19]:

(1) 岩性上倾尖灭油气藏。

岩性上倾尖灭油气藏指的是储层岩性岩相沿上倾方向尖灭,受到泥岩等非渗透性岩层封堵形成圈闭,聚集油气后形成的油气藏。储层岩石一般由砂岩和碳酸盐岩等构成,在陆相湖盆相中比较常见。

(2) 透镜状岩性油气藏。

透镜状岩性油气藏指的是各种透镜状等不规则形状的储层被非渗透性岩层包裹形成的油气藏,一般具有自生自储的特点,如泥岩包裹的砂岩透镜体。

(3) 生物礁块油气藏。

生物礁块油气藏指的是生物礁成因的储层被非渗透岩层封堵形成的油气藏。一般生物礁块引起的构造异常很小,难以作为圈闭识别依据,生物礁块的发现具有偶然性,且常常成群出现。

(4) 成岩封闭油气藏。

成岩封闭油气藏指的是在成岩过程中,储层岩性岩相发生突变,渗透性储层被非渗透性岩层封堵而形成的油气藏。

(5) 特殊岩性油气藏。

特殊岩性主要指的是与常见的砂泥岩相区别的碳酸盐岩和火山岩等,特殊岩性油气藏指的是在成岩作用下,特殊岩性体中的原生裂缝和构造裂缝共同构成储集空间,聚集油气后形成油气藏。

2.3.2 地层油气藏

地层油气藏最突出的特点是储层纵向上有沉积中断现象,与不整合面密切相关,指的是沿地层不整合面,渗透性储层被非渗透性岩层封堵聚集油气而形成的油气藏。主要分为 3 类^[9,19]:

(1) 地层不整合油气藏。

地层不整合油气藏指的是渗透性储层位于不整合面的下方,沿不整合面上方被非渗透性岩层封堵形成的油气藏。这里的不整合可分为角度不整合和平行不整合,角度不整合在地震剖面上特征显著,容易识别,其形成过程受风化剥蚀和沉积间断的影响。

(2) 地层超覆油气藏。

地层超覆油气藏指的是渗透性储层位于不整合面的上方，而它本身又被连续沉积的非渗透性岩层侧向封堵形成的油气藏，主要在水陆交接的地方形成。

(3) 古潜山型油气藏。

古潜山是一种典型的古地貌形态。古潜山型油气藏指的是地层经过复杂的构造运动和长期的风化剥蚀作用后，形成高低不平的基底构造受非渗透性岩层覆盖形成的油气藏，其形成过程同样与不整合面相关。

2.3.3 复杂构造油气藏

构造油气藏是地壳运动，地层发生形变构成圈闭后，聚集油气的结果，在众多油气藏类型中，是一种相对容易识别的油气藏类型，但由于地下地质构造的复杂性，目前仍然有部分构造油气藏难以被发现，可称之为复杂构造油气藏。即复杂构造油气藏指的是基于现有技术水平难以识别和发现的构造油气藏。从构造油气藏的类型出发分为3类^[16,19]：

(1) 复杂背斜油气藏。

复杂背斜油气藏主要强调背斜圈闭的位置具有隐蔽性。地震资料处理中，准确的偏移归位有利于构造识别。

(2) 复杂断块油气藏。

复杂断块油气藏主要突出断层圈闭的位置具有隐蔽性。在复杂小断块油气藏勘探实践中，如何获得断面清晰的地震剖面是关键。

(3) 低幅构造油气藏。

低幅构造油气藏主要是指圈闭的形态结构具有隐蔽性，在油藏特征上难以辨识，依靠目前的技术手段无法从所获得的资料中判别出油气藏的外观特征。

2.3.4 复合油气藏

复合油气藏是基于实用性进行划分的一种类型，指的是受两种或两种以上成因共同作用，难以区分主导因素时的一种油气藏类型，与单一成因油气藏概念相对。如断层—地层油气藏、断层—岩性油气藏、岩性—地层油气藏、构造—岩性油气藏和构造—水动力油气藏等。复合油气藏通常兼具各个单一成因的影响，特点更加复杂。

3 岩石物理基础

3.1 岩石物理研究目的

作为地震勘探技术的基础研究之一，岩石物理致力于研究储层岩石物理性质（一般指岩性、物性和流体特性）的变化对地震波传播速度和吸收衰减等的影响，是联系储层特性和地震响应的纽带，被誉为储层参数和地震属性沟通的桥梁（图 3-1-1）。

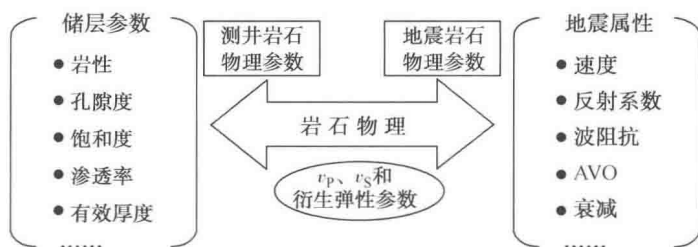


图 3-1-1 储层参数—岩石物理—地震属性关系图

岩石物理研究的主要内容包括基于岩石物理性质的建模和分析两部分。其中，建模指的是为地下岩石与流体建立相应的介质模型，分析指的是基于上述介质模型进行正演模拟分析，弄清楚储层参数与岩石弹性参数和储层参数与地震属性参数之间的关系。由此可见，岩石物理建模是进行分析的基础，它的准确性会对分析结果产生直接影响。

开展地震储层预测和烃类检测，首先要建立岩石特性和弹性参数之间的理论关系或经验公式，明确哪些岩石特性的变化会引起测井和地震响应的改变。通过岩石物理建模和地震正演模拟研究，不仅可以获得高质量的井震标定结果，还可以建立岩性、储层物性和含油气性的定量解释量版，为地震叠前反演和 AVO 烃类检测等技术提供更可靠的基础资料。

3.2 岩石物理模型

地壳表面岩石是一种多相介质，主要包括岩石骨架和孔隙流体，多相介质的等效（或平均）弹性是岩石弹性的主要表现。岩石的弹性模量、纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 和密度 ρ 等地震参数被广泛用于描述岩石弹性特征。岩石的弹性模量反映应力—应变关系，密度 ρ 反映比重，速度反映岩石中地震波传播特征，后者是弹性模量的函数。反之，通过密度 ρ 和纵横波速度（ v_p ， v_s ）可以获得岩石的各类弹性模量参数。岩石弹性模量之间的关系可以通过建立理论模型来反映。基于有效介质理论和基于波传播理论是据建模方法的不同来划分的两种岩石物理基本理论模型^[21,22]。

3.2.1 弹性模量

拉梅系数 (λ 和 μ) 常用来表示均匀各向同性弹性体介质中的应力应变关系。按照弹性介质理论, 地震波纵波速度 v_p 和横波速度 v_s 与介质常数的定量关系为^[23]

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3-2-1)$$

式中, λ 和 μ 是拉梅系数; ρ 为介质密度。

在地震勘探技术中, 常用的弹性模量参数有杨氏模量 E 、剪切模量 G 、体积模量 K (图 3-2-1) 和泊松比 ν 。定义杨氏模量 E 为纵向方向上应力与应变的比例系数; 剪切模量 G 为剪切方向上应力与应变的比例系数; 体积模量 K 为均匀各向同性介质周围的压缩模量, 可用来描述岩石抗压能力; 泊松比 ν 为横向正应变和纵向正应变比值的绝对值。上述岩石弹性模量参数与纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 及介质密度 ρ 之间存在如下关系, 即

$$\lambda = \rho(v_p^2 - 2v_s^2), \quad \mu = \rho v_s^2 \quad (3-2-2)$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} = \frac{\rho v_s^2(3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3-2-3)$$

$$G = \mu = \rho v_s^2 \quad (3-2-4)$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \rho \left(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2 \right) \quad (3-2-5)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3-2-6)$$

由上述关系式可知, 这些岩石弹性模量参数之间可以两两互相转换, 因此只要已知其中两个参数, 就可以推导出其他参数, 根据需要还可以衍生出其他具有不同物理意义的弹性参数。

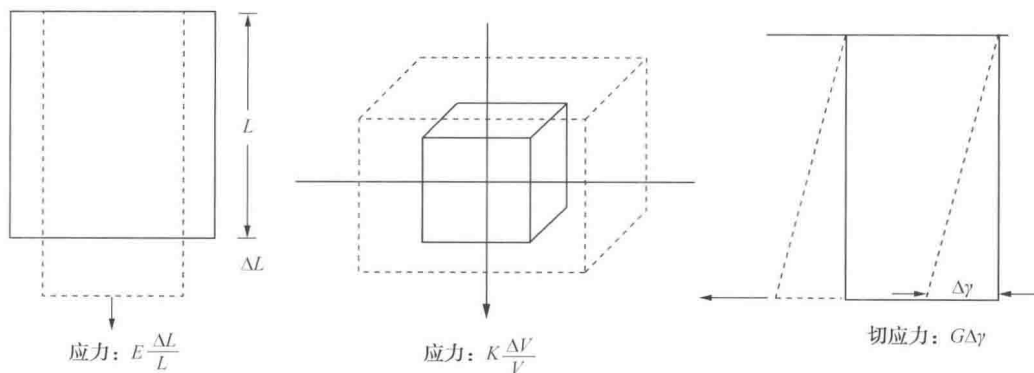


图 3-2-1 弹性模量及其物理意义 (杨氏模量 E 、体积模量 K 、剪切模量 G)^[20]

3.2.2 基于有效介质理论

有效介质理论, 又称为等效介质理论, 是岩石物理学研究的重要理论之一。通常地壳岩石是由多种矿物颗粒和孔隙流体组成的, 具有不均匀性。为了更好地描述岩石特性, 常

借助等效介质理论将岩石描述成一个“等效体”，如在地震勘探中常用的密度和层速度来描述某个地层的特性。岩石在宏观上均匀、各向同性是应用等效介质理论的前提假设。在已知岩石各组成成分的体积含量、弹性模量及各组分分布细节的基础上，根据几何平均物理模型可以预测岩石的等效弹性模量。如何有效地应用等效介质理论，其关键在于等效岩石物理模型的建立。各种常用的等效介质理论模型大致可分为3类：空间平均模型、自适应理论模型和接触理论模型^[24,25]。以下将着重介绍几种常用的等效介质理论模型。

3.2.2.1 Voigt-Reuss-Hill (V-R-H) 模量平均模型^[26~29]

对任意岩石，在已知各组成成分的体积百分含量和弹性模量的基础上，可以设定其等效模量的计算公式为

$$\bar{M}^a = f_1 M_1^a + f_2 M_2^a + f_3 M_3^a + \cdots + f_i M_i^a + \cdots \quad (3-2-7)$$

式中， $\bar{M}$ 表示岩石的等效弹性模量； M_i 和 f_i 分别为第 i 个组成成分的弹性模量和体积百分含量； $a \in [-1, 1]$ ，为常数。

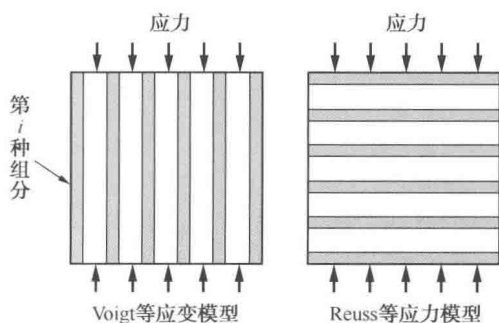


图 3-2-2 Voigt 平均模型和
Reuss 平均模型示意图

Voigt (1928) 和 Reuss (1929) 分别定义了岩石矿物有效弹性模量的上、下限公式。两者都是指平均应力与平均应变的比值，不同点在于 Voigt 平均假设岩石内部应变处处相等，而 Reuss 平均则假设应力处处相等（图 3-2-2）。

假设矿物有 N 种组成成分，则计算上限 M_V 和下限 M_R 的公式为

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i, \quad \frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (3-2-8)$$

式中， M_V 为 Voigt 定义的上限； M_R 为 Reuss 定义的下限； f_i 为第 i 个组成成分所占的体积百分含量，满足 $\sum_{i=1}^N f_i = 1$ ； M_i 为第 i 个组成成分的弹性模量。

在 Voigt 和 Reuss 研究的基础上，Hill (1952) 通过对上、下限取算术平均，提出了 Voigt-Reuss-Hill (V-R-H) 平均模型，即

$$M_{VRH} = \frac{1}{2} (M_V + M_R) \quad (3-2-9)$$

Wang 和 Nur (1992) 对 V-R-H 模型进行了实验测试：研究表明该模型在计算岩石组分的有效体积模量时效果较好，在估算剪切模量和岩石的总体积模量时效果不理想，也不适用于气饱和的岩石。

3.2.2.2 Hashin-Shtrikman 界限模量模型^[20,30]

针对双相介质，在已知各组成成分弹性模量和孔隙度的前提下，基于变分原理，Hashin 和 Shtrikman (1963) 进一步缩小了有效弹性模量的上下界限范围，即

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{f_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + f_1 \left(K_1 + \frac{4}{3} \mu_1 \right)^{-1}} \quad (3-2-10)$$