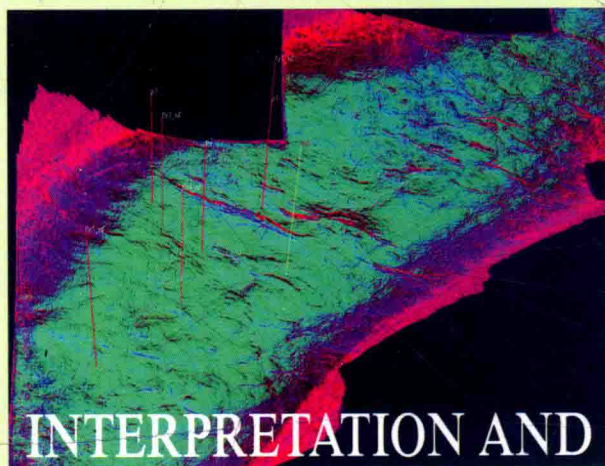


砂岩储层 综合解释与预测

胡伟光 申小平 范春华 等编著



INTERPRETATION AND
PREDICTION OF
SANDSTONE RESERVOIR

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

砂岩储层综合解释与预测

胡伟光 申小平 范春华 等编著



中国石化出版社

内 容 提 要

本书以江汉盆地西南缘松滋油田的勘探实例为基础,系统阐述了致密砂岩储层综合解释与预测的原理及详细的技术方法、应用实例。以探索及研究针对致密砂岩储层的综合解释与预测技术流程为目的,研究中采用了地震资料精细构造解释、地震相分析、叠后波阻抗反演、地震属性及相干体、三维可视化等技术方法,实施致密砂岩储层的构造精细解释及预测,并对各种反演和属性预测结果进行多参数的平面叠合分析,综合相关结果得到有利砂岩储层的大致分布区域;本书还总结了这些砂岩储层预测方法的应用情况及特点,提出致密砂岩储层预测的一些关键技术及参数;利用本书的技术方法及成果可实施陆相砂岩储层的预测,其相关的应用技术及经验可在陆相砂岩储层预测中进行推广。

本书以砂岩储层的地震综合解释与预测相结合,材料翔实,论述深入,不仅在致密砂岩储层预测方面进行分析,同时也系统地提供了砂岩储层预测的思路、方法和技术参数,具有很强的实用性。

本书可供各大石油公司从事砂岩储层的勘探、开发、研究人员阅读,也可作为高等院校石油地质、地球物理、石油工程等相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

砂岩储层综合解释与预测/胡伟光,申小平,范春华等编著.

—北京:中国石化出版社,2015.12

ISBN 978-7-5114-3758-7

I. ①砂… II. ①胡… ②申… ③范… III. ①砂岩储集层-地质勘探-研究 IV. ①P588.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 295974 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 166 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

当今油气勘探逐渐走向构造复杂、深层区域,勘探难度越来越大,取得的油气勘探“亮点”越来越少。传统的油气勘探手段亟需提高,相关的物探技术也需要取得相应的发展、进步。针对含油气盆地的勘探,通过地质认识、物探技术、钻井技术的进步可取得一些新的油气突破。但在勘探的各个阶段对储层的预测无疑是必须的,无论是陆相油气田,还是海相油气田,都需要这样的技术来预测富含油气的储层体系及其分布情况,这也需要物探人员付出更多的智慧、努力和汗水,以此来探索、创新出更成功的储层预测的技术方法。

油气田的勘探是一个长期的过程,不同的认识及勘探手段随时代的进步往往会发生巨大的变化。如四川盆地的沉积地层中往往含有多套油气储层,而勘探就不能局限于某一个油气储层,这些储层中可能有一个储层会带来惊喜。这样的勘探例子有很多,油气勘探实施的“三步法”应该是勘探区内的沉积相研究、沉积相中的有利沉积相分布研究、有利沉积相中寻找更为有利的储层段研究三个阶段,从而稳妥地实施勘探推进,这样就有更大的机会获得油气突破。如四川盆地普光气田的勘探,其陆相勘探沉寂多年,但它的海相礁滩储层却钻获高产工业油气流;川东南的焦石坝页岩气田,其浅层的长兴组礁滩相储层勘探成效不大,而其海相的五峰—龙马溪组页岩气勘探则获得巨大的突破和成功,推动了川东南盆缘构造带的页岩气勘探。所以,正是这些实际鲜明的勘探例子表明,弄清楚勘探区内多套储层的分布情况对实施油气勘探、布设相关井位是相当重要的。

另外,物探技术的进步,使我们得以更为深入、准确地了解地下的地质情况,这得益于物探仪器、计算机及软件技术的进步。随着相关物探技术、地质认识的进步,如叠前裂缝预测技术、流体检测技术以及高分辨率地震资料采集技术现在都能很好地实现,这样就更利于在勘探区域内寻找有利的沉积相中更为有利的

储层段,并在有利部位上布设勘探井。另外,地震成像手段的多样化,使我们更为准确地得到地下地质的构造情况,这样可在了解储层类型及其分布的情况下,准确寻找到勘探部位的高点或次高点,也更有利于钻获工业油气流并获得突破。

其次,钻井技术的进步也使钻井深度得到延伸。现在的勘探深度越来越大,基本上可达到7000~8000m,这样也有利于我们取得地层中更深部位储层的认识,并获得相关的储层参数,有利于进行后续的勘探;水平井及压裂技术近几年来得到长足的进步,在页岩气的勘探中往往见到水平井钻进及分段压裂作业,从而使勘探井获得更大的油气采收率。另外,通信技术的进步也有利于油气勘探的进行,现在的各种视频交流软件,可以促进高水平的专家及勘探者进行更好的交流并使勘探认识得到深化,从而对研究区的勘探认识及区域评价实现进一步的了解。

当下,为了更好地指导及研究致密砂岩储层预测,应石油行业内同行的要求,我们总结了江汉盆地西南缘松滋油田的致密砂岩储层的综合解释与预测相关成果进行分析研究,集成编著成书,探索、研究这个油田的油气勘探的成功经验,期待为中国的油气勘探和储层预测提供一定的指导和借鉴作用。

本书共分为五章。第一章主要介绍致密砂岩储层及其预测相关的技术方法,有助于读者简略了解相关砂岩储层及预测的地球物理方法、技术特点;第二章至第四章重点阐述砂岩储层的特点、综合解释及预测的实践操作、应用情况,利用成熟的商业软件对松滋油田的含油砂岩储层段进行储层综合解释及预测的成果展示及分析;第五章主要是对致密砂岩储层解释、预测技术的集成总结,结论可以给读者一些启示及思考。由于陆相砂岩储层的沉积具有空间上的特殊性,不同的沉积相其孔隙度的大小亦各不相同,而孔隙度这个因素往往又会影响其储集能力;其次,如果储层发育裂缝体系,也有助于原油的产出,所以寻找裂缝发育带也相当重要。主要认识和成果简述如下。

(1)对研究区的沉积相研究及分析相当重要,确定有利沉积相的位置则更能准确地找到富油的砂岩储层,这就需要井资料并结合波形分类技术、地震剖面上波组的反射特征等进行沉积相的研究,从而得到油气富集的砂岩储层的大致分布位置。

(2)利用井震联合反演可以得到砂岩储层的空间位置,砂岩储层与非储层在波阻抗值上具有一定的差异,这个结论也被井资料所证实,当然也可以利用波阻

抗值与孔隙度的转换计算公式,实施孔隙度反演得到孔隙度数据体。反演结果表明低波阻抗、高孔隙度反演数据与高孔隙度砂岩储层相对应,而高波阻抗、低孔隙度反演数据则与低孔隙度或致密砂岩储层相对应。

(3) 相干体技术对大型断裂的预测及小型裂缝带的分辨率还是可以的,松滋油田的大型正断层上盘的断层附近往往发育微型裂缝体系,这些裂缝可对砂岩油气储层起到沟通作用,在储层段的裂缝体系中布设勘探井、开发井或水平井则有利于钻井产出高产的工业油流;后续工作可进一步对砂岩储层进行P波各向异性检测研究,从而确定有利的微型裂缝发育带。

(4) 利用叠后地震资料进行吸收系数分析的研究成果显示,含油砂岩储层通常具有较高的吸收系数,而非储层的砂岩则有较低的吸收系数,这可能是储层的孔隙及裂缝的共同作用而使地震波的衰减比非储层段的衰减相对剧烈。

(5) 砂岩储层中所含的不同流体——如油或水,本书中所使用基于叠后数据体的吸收系数技术对其不能进行分辨,建议后续工作可利用AVO技术中的 $\lambda\rho$ 分析技术实施不同流体预测,探索砂岩储层的油-水识别问题。

(6) 建立地震资料的储层精细解释技术,具体为对储层进行精细标定,利用波阻抗数据体及叠后数据体在剖面上的叠合显示,实施对储层段的层位精细解释,从而得到储层段的空间分布情况。

(7) 精细地震资料解释及变速构造成图技术是了解砂岩储层空间分布的一大手段,构造高部位总比低部位更有利于钻获油气,但还要具体问题具体分析,如要考虑岩性圈闭的问题;其次,利用三维可视化技术可实施断层及层位产状的监控,并对解释成果进行检查及改正。

(8) 地震属性及亮点分析技术可以快速、准确地找到富油的砂岩储层,砂岩储层往往表现出亮点特征及振幅变化率高值等特点,但还要具体问题具体分析,有的亮点并不能反映砂岩含油气,弱反射振幅也不一定是致密砂岩的反映,而在某些砂岩储层中是含油气的反映。

(9) 多种参数的平面叠合分析更有利于寻找富油砂岩储层的平面分布位置,并利于后续勘探及开发的进行。

本书是原中国石化中南分公司参与松滋油田勘探及开发的全体管理及技术人员集体智慧的结晶,从该油田的砂岩储层预测研究成果中进行总结及分析。在这项集体劳动成果即将集结出版的时候,笔者对上述参加人员表示衷心的感谢。

谢!也感谢为本书编撰辛勤付出的绘图人员。

本书在中国石化勘探分公司各级领导的关怀下,由胡伟光、申小平、吴蕾等人共同撰写完成。本书编写的具体分工是:第一章由胡伟光、范春华、倪楷、吴蕾执笔;第二章由胡伟光、吴蕾、申小平执笔;第三章由胡伟光、郑建华、申小平、苏克露执笔;第四章由胡伟光、彭嫦姿、申小平、吴蕾执笔;第五章由胡伟光、范春华执笔。全书由胡伟光统稿完成。

由于现阶段我国的油气勘探进程相对较快,本书中相关砂岩储层的综合解释与预测成果的分析、认识可能存在不足,并且本书成果总结、集成的时间相对紧张,再加上作者水平有限,书中错误和分析不妥之处望读者不吝赐教。

目 录

1 概论	(1)
1.1 致密砂岩储层研究	(2)
1.1.1 致密砂岩储层的基本特征	(2)
1.1.2 致密砂岩储层的成因类型	(2)
1.1.3 致密砂岩储层物性影响因素	(3)
1.2 储层预测研究概况	(5)
1.2.1 地球物理的正、反演简介.....	(5)
1.2.2 波阻抗反演技术.....	(10)
1.2.3 地震属性技术.....	(14)
1.2.4 相干体技术.....	(16)
1.2.5 三维可视化技术.....	(19)
1.2.6 振幅特征分析技术.....	(21)
1.2.7 地震相分析技术.....	(25)
2 含油砂岩储层特征	(26)
2.1 砂岩储层特征.....	(30)
2.2 油气成藏模式分析.....	(32)
3 精细地震解释技术	(34)
3.1 精细地震资料处理.....	(35)
3.2 精细构造解释.....	(38)
3.2.1 精细构造解释方法.....	(38)
3.2.2 断层解释方法.....	(44)
3.2.3 速度模型.....	(50)
3.2.4 成图精度分析.....	(53)
3.3 三维可视化技术.....	(54)

3.4	地震相分析技术	(57)
3.4.1	沉积相研究	(58)
3.4.2	沉积相波形特征	(60)
3.4.3	地震相特征	(61)
4	砂岩储层预测	(66)
4.1	储层地震标定方法	(66)
4.2	井震联合反演方法	(72)
4.3	井震联合反演的实践	(74)
4.4	地震属性提取与分析技术	(78)
4.5	复1号断块渔洋组 K_2y^3 、 K_2y^4 砂岩储层综合分析	(79)
4.5.1	储层地震响应特征	(79)
4.5.2	储层构造形态及厚度分布特征	(80)
4.5.3	波阻抗平面变化特征	(82)
4.5.4	孔隙度分布特征	(82)
4.5.5	反射强度变化特征	(84)
4.5.6	瞬时频率特征	(85)
4.5.7	吸收系数特征	(86)
4.5.8	储层综合分析评价	(87)
4.6	复1号断块沙市组砂岩储层综合分析	(90)
4.6.1	构造特征与厚度分布	(90)
4.6.2	波阻抗特征及有利储层的分布	(91)
4.7	南岗I号构造新沟咀组下段(Ⅱ-1)砂岩储层综合分析	(93)
4.8	谢凤桥—丁家湖新沟咀组下段(Ⅲ ¹)砂岩储层综合分析	(98)
4.9	谢凤桥—丁家湖新沟咀组下段(Ⅲ ²)砂岩储层综合分析	(102)
5	结束语	(106)
	参考文献	(108)

1 概论

中国是世界石油资源大国,常规石油地质资源储量约为 $765 \times 10^8 \text{t}$,可采资源储量约为 $212 \times 10^8 \text{t}$ 。但含油气盆地总体上规模较小,地质条件复杂,勘探难度大,与世界其他产油大国相比,我国发现的世界级大油田相对较少。

我国石油探明程度依然较低,平均只有 33%。主要产油盆地仍然是未来寻找常规石油储量的主要阵地,尤其是渤海湾、松辽、鄂尔多斯、塔里木、准噶尔等大型油气盆地。通过老油田挖潜和新油田的发现,这些盆地仍有很大的储量增长潜力。

从 140 多年的世界石油勘探历史来看,大多在经过常规构造油气藏普查、勘探、开发之后,勘探领域从陆架趋向海洋,勘探区块从盆缘构造带转向外围及盆内洼陷区,勘探目标从中浅层加深到中深层,勘探类型从构造圈闭到隐蔽油藏。我国中、东部中、新生代断陷盆地经过 40 余年的勘探开发实践,已形成“陆相生油”和“复式油气聚集带”等理论,到目前为止,大多数老油田已进入高含水阶段,需要不断挖潜和拓展新的勘探领域。

江汉盆地^[1~6]是我国中部内陆断陷盆地,江陵凹陷是江汉盆地最大的次级构造单元,也是继潜江凹陷之后的又一个富烃凹陷。松滋油田^[7~9]则位于江汉盆地江陵凹陷的西南部,该区的油气勘探工作始于 20 世纪 70 年代初期,由于物探技术及钻井技术落后,加上地质认识不够深入,导致该区的油气勘探相对滞后。在 1994 年原中国石化中南分公司经过实施大量的钻井、地质及物探工作后,分析认为松滋油田在新沟咀组下段沉积时为一缓坡三角洲沉积体系,在控相断层的下降盘(上盘)容易形成一些水下扇沉积微相砂体,局部存在好的储层发育带,经过二维地震资料的精细解释和储层预测,在构造高部位上部署了第一口探井——Es4 井,实现了首钻突破的目标,另外,在后续的油气勘探中,Es8 井和 Es11-1 井在白垩系渔洋组的油气勘探中获得重大突破,发现了新的砂岩储层。松滋油田的这些勘探历程表明:陆相砂岩储层单层厚度薄、储层非均质性强、横向变化快,并且研究区内的构造具有复杂性。由于研究区内的砂岩储层大多数是致密砂岩储层,所以对其储层的综合解释及预测技术要求相对较高。

1.1 致密砂岩储层研究

1.1.1 致密砂岩储层的基本特征

致密砂岩储层^[10]具有岩性致密、低孔低渗、气藏压力系数低、圈闭幅度低、自然产能低等典型特征。由于不同学者所研究的对象和角度不同,对致密的理 解也不尽相同。低渗透储层本身就是一个相对概念,随着资源状况和技术条件的变化,致密储层的标准和界限也会随之变化,因此长期以来致密砂岩储层一直没有一个完整的、明确的定义和界限。美国联邦能源管理委员会(FERC)把低渗透(致密)天然气储层定义为估算的原始地层渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或者小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (B. E. Law 等, 1986)的储层。关德师(1995)等在《中国非常规油气地质》中,把致密砂岩气藏的储层描述为孔隙度低(小于12%)、渗透率比较低(小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、含气饱和度低(小于60%)、含水饱和度高(大于40%)。杨晓宁(2005)认为致密砂岩一般是指具有7%~12%的孔隙度和小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的空气渗透率,砂岩孔喉半径一般小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。按照我国的标准,致密储层有效渗透率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (绝对渗透率 $\leq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、孔隙度 $\leq 10\%$ 。另外一般具有较高的毛细管压力,束缚水饱和度变化也比较大,一般储层中的束缚水饱和度都比较高。张哨楠^[11-13]根据对鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层束缚水饱和度的分析,该砂岩储层的束缚水饱和度都在40%以上;在孔隙度为4%~11%的范围内,束缚水饱和度在42%~56%之间变化。他根据对四川盆地上三叠统致密砂岩储层^[14]孔隙度和束缚水饱和度的统计,用两种方法测试的结果表明束缚水饱和度和孔隙度之间存在负相关关系。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层的孔隙度、渗透率和束缚水饱和度之间的关系同样说明致密砂岩储层的束缚水饱和度随着孔隙度和渗透率的降低而增高。

1.1.2 致密砂岩储层的成因类型

致密砂岩储层与常规砂岩储层相比具有特殊的特征。Soeder 和 Randolph(1987)将致密砂岩储层划分为3种类型,即由自生黏土矿物沉淀造成的岩石孔隙堵塞的致密砂岩储层、由于自生胶结物的堵塞而改变原生孔隙的致密砂岩储层和由于沉积时杂基充填原生孔隙的泥质砂岩。Shan-ley 等(2004)认为了解常规储层和致密储层之间的岩石学特征对于理解致密储层和预测致密储层是非常关键的;而且指出,致密砂岩储层并不总是由于砂岩成分的不成熟、泥质杂基含量高所造成的,在成分成熟度较高的砂岩中一样存在着致密储层。张哨楠按照砂岩储层的致密成因,将致密砂岩储层划分为4种类型。

1) 由自生黏土矿物的大量沉淀所形成的致密砂岩储层

此类致密储层可以是结构成熟度和成分成熟度均比较高的砂岩,也可以是结构成熟

度较高而成分成熟度不高的砂岩。其岩石类型为石英砂岩, 硅质岩碎屑含量比较高, 岩石的分选性好, 颗粒之间没有任何黏土杂基存在; 但是在埋藏过程中由于自生的伊利石堵塞了颗粒间的喉道, 喉道间的连通主要依靠伊利石矿物间的微孔隙, 这使得岩石的渗透率极低, 然而孔隙度的降低与渗透率相比不太明显, 主要形成中孔、低渗的致密储层。

2) 胶结物的晶出改变原生孔隙形成的致密砂岩储层

在砂岩储层埋藏过程中, 由于石英和方解石以胶结物的形式存在于碎屑颗粒之间, 极大地降低了储层的孔隙度, 储层的渗透率也随之降低, 形成低孔、低渗的致密储层。在孔隙中可以保存形成时间比较早的次生孔隙。其岩石类型为岩屑石英砂岩, 岩石的分选性较好, 含有少量的长石, 孔隙类型主要有长石早期溶蚀形成的粒内溶孔以及高岭石的沉淀形成的晶间微孔隙。

3) 高含量塑性碎屑因压实作用形成的致密砂岩储层

对于距离物源比较近、沉积环境水体能量不高、沉积物成分比较复杂, 尤其是塑性和不稳定碎屑含量较高的储层, 埋藏过程中在没有异常压力形成的条件下, 因压实作用使塑性碎屑变形从而呈假杂基状充填于碎屑颗粒之间, 导致砂岩储层成为致密储层。

4) 粒间孔隙被碎屑沉积时的泥质充填形成的致密砂岩储层

在低能条件下或者在浊流条件下, 由于沉积水体浑浊或者因水体能量不高, 碎屑颗粒间杂基含量比较高, 成为泥质砂岩。由于粒间孔隙被杂基所占据, 孔隙间的流体交换不顺畅, 无论早期还是晚期的溶蚀性流体都很难进入到孔隙中, 因此粒间孔隙或者粒内孔隙都不发育; 在泥质杂基中因成岩作用的关系可能发生重结晶或者微弱的溶蚀, 形成杂基内的溶蚀微孔隙。

1.1.3 致密砂岩储层物性影响因素

唐海发(2007)等^[15]以鄂尔多斯盆地上古生界下石盒子组盒二段储层为例, 综合利用岩心、测井以及各种分析化验资料, 通过储层沉积学、岩石学和成岩作用的研究, 详细探讨了该区致密砂岩储层物性的主控因素, 从沉积微相、砂岩岩矿组成、成岩作用3个方面给予描述。

1) 沉积微相

沉积微相不仅控制砂体的类型、形态、厚度、规模及空间分布, 影响砂体的平面和纵向展布与层间、层内的非均质性, 而且还在微观上因其决定着岩石碎屑颗粒大小、填隙物的多少、岩石结构(分选性、磨圆度、接触方式)等特征, 从而控制了岩石原始孔渗性的好坏, 因此沉积微相对储层物性的控制是先天性的。

研究表明, 沉积微相类型不同, 其砂体的发育程度不同, 并最终影响储层物性的非均质程度。可以通过储层物性的定量特征, 来表征沉积微相的这种控制作用(表1-1)。

表 1-1 不同沉积微相不同岩性的物性参数统计表

参数	辫状河主河道				河道边缘				洪泛平原		
	砾岩	粗砂岩	中砂岩	细砂岩	砾岩	粗砂岩	中砂岩	细砂岩	中砂岩	细砂岩	粉砂岩
孔隙度/%	7.65	8.17	5.74	4.97	2.91	6.19	4.00	3.18	6.26	2.89	1.85
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	1.26	0.60	0.47	0.18	0.09	0.45	0.11	0.16	0.31	0.12	0.06

由此可见,不同相带——由洪泛平原→河道边缘→辫状河主河道微相,随水动力强度增大,储层物性条件逐渐变好。同一相带内储层物性的分布,随着砂岩粒级的增大而变好,其中砾岩、粗砂岩物性最好,中砂岩次之,细砂岩、粉砂岩较差。而且,同一粒级的砂岩所处的相带不同,其物性亦差别很大。一般来说,辫状河主河道中的砂体,因其水动力能量最强,岩屑等细碎屑含量相对较少,物性最好,河道边缘次之,洪泛平原最差。

2) 砂岩岩矿组成

沉积微相控制了储层物性的宏观分布,而砂岩的矿物组成和填隙物的含量则直接影响着储层原始的储集性能和渗流性能,并且是储层成岩改造的物质基础。盒二段储层主要发育岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩 3 种基本岩性,砂岩中岩屑的含量较高,这是导致研究区内储层物性较差的一个重要原因。随着石英等刚性颗粒含量的增加,岩屑等柔性颗粒含量的减少,储层的储集性能明显变好。另外,由于部分长石被溶蚀,可形成一些次生孔隙,使得砂岩储集条件得以改善。

3) 砂岩成岩作用

成岩作用这一概念自贡别尔(Von Gumbel, C. W. 1886)提出已有 100 多年的历史。在 20 世纪 40 年代以前,主要是对碎屑岩的研究,特别是对其中的一些矿物如石英、长石、锆石等的自生作用进行观察。自 40 年代及 50 年代发现了中东及加拿大的碳酸盐岩大油田后,碳酸盐岩石学、沉积学及成岩作用方面的研究在 60 年代和 70 年代蓬勃发展。就在碳酸盐岩研究工作方兴未艾之时,在 70 年代后期和 80 年代初,人们的注意力又开始转移到碎屑岩的研究上来。

在 50 年代以前,成岩作用的研究多限于描述性的工作。60 年代以来人们着重研究成岩作用过程及其相对时间顺序,成岩环境和不同环境下形成的成岩结构。有许多著作将古代的岩石与现代沉积物相对比,做了许多详细的近地表的早期成岩组构的岩石学研究和地下的埋藏成岩作用研究。下面分别对一些主要的成岩作用进行简略描述:

(1) 砂岩次生孔隙。

自 70 年代以来,砂岩成岩作用研究的最重要突破是发现了砂岩中有大量成岩作用形成的次生孔隙及其形成机制。随着油气勘探和研究的进展,现已证实有些砂岩油气储层的孔隙往往以次生的为主,否定了砂岩中都是原生粒间孔隙的传统概念。近年来在砂岩次生孔隙成因机理的研究方面有了新的进展。新研究成果表明,硅酸盐矿物(包括石英)的溶蚀比过去所报道得更普遍。

砂岩中次生孔隙的发现,从理论上为寻找深部油气藏提供了依据,扩大了油气勘探领域。世界上不少地区已在地表4000m以下发现了高孔隙、高渗透性砂岩油藏,如塔里木盆地的深埋优质砂岩储层则属剩余原生孔隙型。不少学者和研究机构正在研究盆地中砂体孔隙演化和分布的预测模型,预测地下孔隙度窗口和有利孔隙带的分布。

沉积盆地中由于干酪根析出的 CO_2 总量计算表明,形成次生孔隙需要大量腐植酸干酪根。但在很多盆地中所形成的 CO_2 及孔隙水流太少,不是以产生大量次生孔隙。但是,与黏土矿物反应可以提供另外的酸来源。

(2) 沉积相、物源及构造。

成岩作用受许多地质、地球化学因素的影响,其中主要的因素是沉积相、物源及构造。近年来,不少学者开始注意研究这些因素。

①沉积相和物源。沉积相和对成岩作用有明显的影响。如不同沉积相带形成不同的早期胶结物,这对次生孔隙的形成具有重要影响。例如海相砂岩中常有碳酸盐胶结物,在后期埋藏成岩过程中,易溶蚀而形成次生孔隙和成岩致密带。另外,在海水与淡水交替带往往形成硅质胶结,可形成成岩圈闭。

各种成岩作用的强度及特性受砂岩沉积环境控制。砂岩的原始成分和砂体的几何形态是控制成岩特征的两个主要因素。

②构造。构造对成岩作用及储集性也有明显的控制作用,国外已开始注意对此问题的研究。如姆克布赖德(Mcbride, 1983)研究了墨西哥北部的上白垩统河流相砂岩。该区的南部和北部砂岩矿物成分相似,但储集性有明显的差别,这取决于沉积后盆地发展史不同。

(3) 埋藏作用。

沉积物在有效埋藏后到经受变质之前,随埋深或温度及压力增加所发生的一切变化,均属埋藏成岩作用,烃类也是埋藏成岩作用的产物。研究埋藏成岩作用的纵向变化特征,对石油勘探和开发都有实际意义。

随埋深增加,颗粒接触处的压力和正应力增加,使机械压实和压溶作用增强。其结果导致颗粒排列得更紧密,矿物的溶解度增加,如存在超压,则使压溶作用降低。

温度随埋深增加所产生的影响更大:①矿物的溶解度改变;②降低了离子的水化作用,使在地表温度下强烈水化的离子(如 Mg^{2+} 、 Fe^{3+})更有效地进入矿物相(形成富含铁镁的碳酸盐);③水化矿物如蒙脱石和高岭石会变得不稳定,并形成含水少的矿物相。黏土矿物和沸石类矿物对温度变化最为敏感,都能作为地质温度计使用。

1.2 储层预测研究概况

1.2.1 地球物理的正、反演简介

自从石油勘探行业诞生以来,地球物理学家就一直致力于求解反演问题。在地球物理

勘探中，解释人员总是基于地面观测数据如地震记录或势场记录来推断地下特性。他们事先在头脑中形成一个粗糙的反映地面记录形成过程的模型，解释时通过这个粗糙的模型根据实际观测到的地面记录重构地下特性。按现代的说法，这种根据观测数据推断地下特性的工作就是求解所谓的“反演问题”。相反，“正演问题”就是在给定地下特征和特定的物理定律成立的前提下确定所能记录到的数据。直到 20 世纪 60 年代初地球物理反演才真正在地球物理学家的头脑中扎下了根。从那时开始，人们就尝试开展定量的和通用的地球物理反演，所采取的方法是一方面求助于理论的扩展，另一方面借助于计算机的能力将这些理论付诸于实际应用。应该指出，理论和计算机算法无论如何都不可能替代最终裁决人——地球物理解释人员来决定最终反演结果是否有意义。

按照上述很广义的反演问题定义，在处理中应用的那些熟悉的算法都可以看作地球物理数据的转换程序。例如，地震偏移就是试图根据地震记录重建实际的地下地层形态 (Gardner, 1985)。地层反射系数的反演可以通过预测反褶积衰减多次波反射来实现 (Peacock 和 Treitel, 1969)，或通过地层脉冲响应中的一次波和多次波的模拟来实现 (Lines 和 Treitel, 1984)。振幅随偏移距的变化 (AVO) (Castagna 和 Backus, 1993) 处理包括地面振幅测量结果的岩性反演等。反演能处理不同类型的地球物理数据。由此，人们能够将不同的地球物理数据集 (例如地震、势场和井中数据) 与同一个地层模型同步地或顺序地进行拟合 (Lines 等, 1988)。其他反演的例子很多，不胜枚举。在每一种情况下，都是假定物理定律是成立的。例如，在地震反演中这个定律就是波动方程或是其某种近似。这样，基于物理定律的算法就使我们能够将观测到的数据转换成地下特征，这些特征都曾在其特定的位置上对观测结果产生过影响。

1) 理论背景

反演可以定义为一种方法，借助于这种方法，人们可以获得精确描述观测到的数据集所推测的地下模型。以地球物理数据为例，观测结果包括那些可称之为地下构造的物理特征信号，即由地震震源或电磁源激发产生的构造反射 (或散射) 波场、构造异常重力场或磁场等。有关现代反演方法的理论基础在 Backus 和 Gilbert 早期的 (1967、1968、1970) 著作中均可以找到。

反演处理与正演模拟密切相关。正演模拟利用数学关系如波动方程来合成地层模型的激发响应，例如地震能量脉冲。地层模型是由一组参数如层速度和层密度等来定义的。这里，如何选择能精确描述观测结果的正演模拟方法肯定是非常重要的。在地震勘探中，正演模拟是用一种生成合成地震记录的算法来实现的，这些算法有地震射线追踪法、有限差分法或有限元波动方程解法等。在重力勘探中，正演模拟方法包括根据假定的地下密度分布计算重力场的规则。除了选择合适的数学模型外，了解应该使用多少模型参数和哪些参数最有效也是很重要的。“正确”模型的选择取决于所面对的勘探问题。例如，水平层状模型可能对堪萨斯中部的地质情况合适，但肯定不适用于怀俄明逆掩断层带和阿尔伯特山前带。

反演或“反演模拟”试图根据给定的一组地球物理测量结果重建地下特征，重建工作以模

型响应“拟合”测量结果的方式进行,拟合工作通过某种误差测量方法来完成。因此,选择“好”模型是至关重要的。但即使模型选择得很充分,仍然有大量的问题需要解决。事实上, Jackson(1972)曾将反演中肯地描述为“对不精确、不充分和不一致的数据进行的解释”。

在回答这方面的一些问题中,采用符号注释可能更方便些。例如,将正演模拟过程表示为变换 $f = T(x)$,这里 f 是模型响应, x 是一个包含地下模型参数集的矢量, T 是某种线性或非线性变换,假定它能以数学方法描述某种被观察的物理过程。在地震勘探中, T 以合成地震记录的形式产生一个模型响应。这样,反演方法可以被写成 $x' = T^{-1}(y)$,式中, x' 现在是一个包含由数据矢量 y (数据空间)导出的地下模型参数集(模型空间)的矢量。这样,算子 T^{-1} 就表示从数据空间到模型空间的逆变换。

尽管模型选择(或 T 的选择)在物理上是有意义的,但仍存在大量的问题。首先, T^{-1} 或许是不可确定的。其次,所要求的数据可能有“盲点”,例如,地震震源可能没照射到地下给定的部分,因此根据记录数据没有办法重建该部分。此外,实际数据总会受到噪声的污染,除理论情况外,可以预料在给定的测量误差范围内将有不止一个地下模型满足所观测到的数据,换句话说,反演是非唯一的。对这些问题理论研究人员已经做过大量的研究工作,反演问题是“不适定的”,即解矢量 x' 中的微小变动就能在模型响应 f 中产生很大的变动;观测数据 y 中微小的变动就能在解矢量 x' 中产生很大的变动。

人们尝试用合适的最优化算法进行观测地球物理响应与理论地球物理响应之间的匹配。设计这些算法的目的是使观测数据与计算数据之间的某种差异测量达到最小。大多数方案都是首先对模型参数作初始估计,据此可计算出初始模型响应。然后,用最优化算法产生一组调节或修正参数的估计值;接下来将这些修正参数“插入”理论模型,由此得到的新理论响应应该改善数据的匹配。如果情况如此,就说明反演是收敛的;否则,尽管已知的方法总是无效的,但有大量的替代方法来达到收敛的目的。因为模型响应通常是模型参数的非线性函数,所以有必要以迭代的方式完成这些运算;这就是说必须多次重复执行上述过程,直到理论响应和记录到的地震响应之间的吻合程度令人满意为止。

这两种响应之间的美好匹配提供的是使运算收敛于地下实际情况的必要条件而不是充分条件。如前所述,大部分运算所获得的解是非唯一的。事实上,可以证明,在规定的误差范围内,有一系列的解满足这些数据(Cary和Chapman,1988)。但是地球物理工作者能够约束这些解,使之向地下参数的先验知识靠近。这类约束可能是“硬的”(如在某一上、下层面之间密度和速度是确定的),也可能是“软的”,可以用多维概率密度函数的形式表达出来,这里概率密度函数的维数等于描述给定模型参数的个数。描述模型参数先验知识的先验概率密度可以与所谓的“似然率函数”结合使用,似然率函数主要依赖于模型响应与观测数据之间的匹配。高斯曲线(钟形)是先验概率密度函数的简单的一维例子,其峰值对应于给定模型参数的最可能值,其宽度是对该模型参数可能值范围的先验估计结果的量度。这样就获得了给定反演问题的解的所谓后验概率密度分布。最后得到的多维后验概率分布的峰(可能是多峰)将揭示模型参数值的最可能分布。这些值转过来又应该在给定误差

范围内产生满足观察数据的模型响应。Tarantola(1987)就是这种反演哲学的早期提倡者之一。他的思想是在英国统计学家 Thomas Bayes(1773)的经典著作的基础上产生的,更新的文献将该方法称为“Bayesian 反演”。有关这方面的深入探讨参见 Duijndam(1988), Gouveia 和 Scales(1997, 1998)的文章, Scales 和 Snieder 于 1997 年发表的一篇论文已对 Bayesian 反演的更广泛的含义作了深入的探讨。可以说, Bayesian 反演在勘探地球物理界已经获得了广泛的应用,其未来前景会更加广阔。

反演计算的结果既取决于正演模型(其响应应该与观测数据相匹配)的选择,同时也取决于合适的最小化误差原则的选择。常规的方法是建立在累积最小平方误差(LSE)和累积最小绝对偏差(LAD)的基础上的。除误差标准的选择之外,通常也可采用光滑约束来避免解矢量中的虚假振荡(Constable 等, 1987)。

一般情况下,(广义)非线性问题是用给定最优化算法的迭代使用来求解的。问题是为了达到收敛于“正确”地下模型的目的,初始推测必须“接近”实际情况。更为常见的是,在分辨率与噪声抑制之间存在一种折衷:只有以降低噪声抑制效果为代价才能获得较高分辨率的解,反之亦然(Jackson, 1972; Treitel 和 Lines, 1982)。换句话说,总是在解的分辨能力与其响应拟合观测数据的能力之间寻求一个折衷。所以,目前已有不少人以极大的兴趣开发所谓的“全局优化”算法,这种算法起码在理论上能够产生使其响应与观测数据拟合得到很好的模型。在这些方法中要特别提一下遗传算法和模拟退火法(Smith 等, 1992; Sen 和 Stoffa, 1995),以及蒙特卡罗搜索法(Cary 和 Chapman, 1988)。近些年来,人们用人工神经网络求解反演问题的兴趣也在不断增加(Calderon-Macias 等, 1998)。

2) 常规反演方法

大量地震数据的处理都是以一维水平层状介质模型为基础的,即基于局部地质情况可以用一叠水平均匀平行地层(各层具有特定的密度、速度和厚度)来近似表达的前提。这种简单的地质模型允许人们用 Dix 公式,根据观测到的地震反射时间和已知的震源、接收器位置来估算层速度。换句话说,就是通过确定(根据观测到的旅行时)层速度用 Dix 公式求解地球物理反问题。Dix 方法一直被广泛应用至今的事实说明了简单一维地下模型的能力和通用性。

水平层状介质模型还形成了我们所熟悉的共中心点(CMP)叠加方法的基础,在 CMP 叠加中,对同一炮检中点的一些地震道进行正常时差校正求和,产生一个逼近一维层状介质垂直入射平面波响应的求和道。本着这种数据处理方法,形成了一种由介质反射系数(即地下垂直入射、反射系数序列)与震源子波褶积给出的地震道模型,这在勘探地球物理界广为流行且获得了极大的成功。在这种情况下,一维反演方法的目标就是从 CMP 道中恢复反射系数的估计值以及地层厚度和各个界面上的阻抗差。

层状介质垂直入射、反射系数的估计几乎都是以 Goupillaud 模型(Goupillaud, 1961)为基础的。这种模型包括一个所有地层都具有相等双程旅行时的分层体系。后来, Kunetz (1964)用 Goupillaud 模型提出了一种反演方法,根据层状介质脉冲合成地震记录产生了反