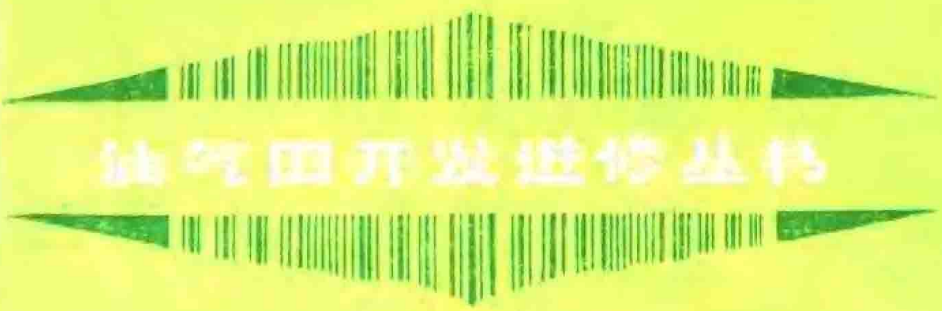




油气田开发进修丛书

碎屑岩储层沉积基础

袁亦楠 编著

石油工业出版社

油气田开发进修丛书

碎屑岩储层沉积基础

裘亦楠 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

碎屑岩储层在油气田中占有很重要的地位。储层沉积相研究是认识油田、合理开发油田的基本手段之一。本书根据碎屑岩沉积相研究的近代发展,着重介绍已经建立起来的各种沉积环境下砂体的沉积模式以及所必然产生的储层各项特征非均质性的一般规律。

本书有助于油气田开发开采工程技术人员了解有关沉积相研究的基本概念和现代新进展。

油气田开发进修丛书

碎屑岩储层沉积基础

裘亦楠 编 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 5印张 112千字 印1—1,500

1987年2月北京第1版 1987年2月北京第1次印刷

书号: 15037·2665 定价: 1.10元

丛书出版前言

当前世界科学技术发展日新月异，每年发表的科技论文在二千万篇以上，而文献的数量几乎是以每十年翻一番的速度递增；涉及多学科的油气管开发的技术进展及文献积累也不例外。因而从七十年代开始，各主要石油国家都越来越重视知识更新；重视在职继续教育，注意改善和提高技术素质；重视信息资源的开发，以促进油气管开发的现代化。例如国际著名的石油工程师协会（SPE）持续出版了评述型的石油技术专论丛书；美国石油地质家协会（AAPG）发行了该会讲师团在世界各地巡回进行继续教育的专题讲座系列；法国石油研究院（IFP）出版了一系列的提高型油田开发技术专著；荷兰及英国壳牌国际石油公司（Shell）也将历年培训教材以石油科学进展丛书的名义陆续出版；西德也出版了一套便携式入门型石油地质及工程基础丛书。这些具有不同特色、水平、范围的丛书竞芳争艳，反映了国际石油界对智力投资和人才开发的重视。

我国因十年动乱造成石油教育的青黄不接，专业图书供应缺乏，脱产进修、技术讯息交流都存在不少困难；党的十一届三中全会以后，在北京和各油田都曾组建了各种形式的培训机构，但还远不能适应生产发展和技术进展的需要以及技术人员的自修要求。

中国石油学会石油工程学会根据上述情况，并根据北京油气管开发技术培训中心数年来的教学实践，决定邀请有关人员成立“油气管开发进修丛书编委会，聘请学有专长和实践经验丰富的专家教授，撰写若干专题性著作，并将陆续出版为广大油气管开发技术队伍服务。第一批的选题包括：碎屑岩储层的沉积基础，气藏开发工程基础，油气管开发测井基础，油藏物理基础，渗流力学基础，试井分析理论基础，油藏工程分析方法，油藏数值模拟基础，自喷采油基础，机械采油基础，酸化压裂原理，分层注采工艺，油田化学基础以及提高油藏采收率方法等。今后还将按技术进展和生产及培训需要，继续增加选题，选聘更多人士参预丛书的编撰和审查。

丛书的读者对象是大专毕业和从事油气管开发实践的工程技术人员。它着眼于巩固专题基础，加强知识反馈，促进技术更新。它不同于高等学校教材，也不同于一般专著。丛书的各个专题将分系统、科学地介绍基本概念、基本理论与基本方法。力求理论联系生产实际，反映技术进展动向，阐明技术问题，同时将综合反映出油气管开发技术的多个侧面及其内在联系。

考虑到有关专业术语、符号、量制尚待统一制定，因此丛书的专业符号尽量采用国际比较通用的石油工程师协会（SPE）、测井分析家协会（SPWLA）的标准符号；量制则按国家颁布的标准以求一致；关于专业术语将尽量协调一致，避免一义数名、一名多义。

由于我们的工作经验不足，在编辑过程中可能会出现一些缺点和问题，请广大读者看后提出宝贵意见。

中国石油学会石油工程学会

一九八三年七月

油气田开发进修丛书编委会

谭文彬 秦同洛 韩大匡 张朝琛 刘翔鹭

王乃举 万仁甫 赵 芬 郑育琪 赵 钧

绪 言

碎屑岩储层在油、气田中佔有很重要的地位。据美国D.克莱姆统计,世界大油、气田中(原油可采储量7000万吨以上或相当的气储量)60%以上的储量在碎屑岩储层中,产量则佔65~70%。假如除了碳酸盐岩储层为主的中东以外,则佔80%的储量。我国以众多陆相含油气盆地著称于世,碎屑岩储层更有着特殊的重要地位,目前已开发的油气田,90%以上的储量在碎屑岩储层中。碎屑岩储层地质研究是石油开发地质工作中最重要的任务之一。

储层地质研究的任务是按油藏工程的需要,对所开发的储层作出正确的地质描述。随着计算机技术的飞速发展,油藏数值模拟已成为油田开发工作中广泛应用的手段。而油藏数值模拟必不可少的基础是一个尽可能反映客观实际非均质性的储层地质模型。七十年代后期以来,逐步出现和形成、并很快为广大石油工作者所接受的地质、地球物理、工程三个专业协同,共同管理油田开发的作法,其中的关键技术就是储层描述和油藏数值模拟。

认识储层主要依靠钻井,而钻井井数总是有限的。油田评价和开发设计阶段,依据的是数公里井距的探井;油田投入开发以后的井距仍有数百米。钻井所取得的资料是少数岩心和间接资料——测井曲线和解释数据。认识储层存在着资料控制程度小于储层变化程度的矛盾。特别是碎屑岩储层,相变快,非均质性严重,这一矛盾更为突出。储层地质工作者面临的问题是不仅能利用现有钻孔的资料进行详细“描述”,而且要对一些现象作出合理的判断和“解释”,并能作出一定程度的“预测”,把分散的钻孔储层资料连系起来得出一个完整的三维的储层概念。这样,储层沉积相这一研究手段也就应运而生。正如D. B. 马肯兹说得对:“即使在40英亩(约16公顷)或更小井距控制的地区内,……在对沉积模式缺乏认识的情况下,一口井通常不能很好地与下一口井进行对比,或者不能充分表明油层的特征。”

碎屑岩储层成为目前开采时的面貌,是由其沉积成因和沉积后经历的地质历史中遭受的变化决定的。一般来说,是经历了三种地质作用综合的结果,这就是沉积作用、成岩作用和构造作用。而沉积作用是决定性的内因,成岩作用和构造作用是在沉积作用结果基础上进一步改造碎屑岩储层性质的,在一定程度上受到沉积作用的制约。所以要想正确描述储层,首先要从研究沉积成因入手。

通过储层沉积相研究,所以能成功地认识储层各种特征的非均质性,关键在于大量现代沉积的调查和积累,建立了各种沉积环境的沉积模式(概念模式)。人们可以应用比较沉积学,将今论古,从而大大提高了对储层的描述和预测能力。

七十年代以来,储层沉积学的兴起和迅速发展,就是为了适应油田开发技术的发展和油田开发管理的要求。它一开始出现就引起了油田开发工作者——不仅是地质家而且是工程师——的广泛重视,把它作为一项新技术给以很高的评价。美国《石油工艺杂志》编者认为是一个“里程碑”,著名采油工程师J. G. 理查森把储层沉积相研究列为展望2000年提高石油采收率的五大技术之一。当前,储层沉积学正处于方兴未艾的阶段,沉积学工作者和开发地质工作者,正在不断应用沉积学的近代成就,力求对储层的描述和预测从定性向半定量到定量方向发展。

根据碎屑岩沉积相研究的近代发展,结合本书读者对象,不从一般沉积学原理说起,着

重介绍从现代沉积调查中已经建立起来的各种沉积环境下砂体的沉积模式，以及所必然产生的储层各项特征非均质性的一般规律。目的是使读者能了解一些基本概念和近代新进展，为今后深入学习和实际工作中应用打个基础。由于编者水平有限，难免有错误和不当之处，请读者提出批评指正。

在讨论碎屑岩储层沉积学的有关问题之前，让我们首先简要地回顾一下，油田开发技术发展至今日之水平，对碎屑岩储层的地质研究，已提出了一些什么样的内容，这也是储层沉积学研究必须首先明确的目的。

目 录

绪 言

第一章 碎屑岩储层地质研究内容	(1)
第1节 微观孔隙结构	(1)
一、孔隙、喉道分布	(1)
二、粘土基质	(2)
三、砂粒排列的方向性	(2)
第2节 基础岩性和物性	(3)
一、岩石学研究	(3)
二、油层物性	(3)
三、岩石和流体相互联系的油层物理性质	(3)
第3节 层内非均质性	(3)
一、粒度层序	(4)
二、沉积构造的垂向演变	(4)
三、层内不稳定薄泥质夹层的分布	(4)
四、成岩作用引起的层内薄隔层	(4)
五、重油、沥青充填条带	(4)
六、压实、滑动引起的微裂缝	(4)
第4节 平面非均质性	(5)
一、砂体几何形态及各向连续性	(5)
二、砂体连通性	(5)
三、砂体内渗透率、孔隙度平面上的变化	(5)
四、裂缝引起的渗透率方向性	(5)
第5节 层间非均质性	(6)
一、分层系数	(6)
二、各砂层间渗透率的差异	(6)
三、主力油层与非主力油层在剖面上的配置关系	(6)
四、层间隔层	(6)
五、构造裂缝	(6)
六、小 结	(6)
第二章 冲积扇砂砾岩体	(7)
第1节 一般沉积机理	(7)
一、河流水携搬运	(7)
二、泥石流搬运	(7)
第2节 亚相和微相	(8)
一、扇根	(8)

二、扇中.....	(8)
三、扇缘.....	(8)
第3节 储层特性.....	(10)
一、冲积扇储层几何形态.....	(10)
二、冲积扇砂砾岩储层微观孔隙结构特征.....	(10)
三、平面孔隙度和渗透率非均质性.....	(10)
四、层内非均质性.....	(11)
第三章 河流砂体	(13)
第1节 辫状河砂体.....	(14)
一、一般沉积机理及类型.....	(14)
二、储层特性.....	(18)
三、识别标志.....	(19)
第2节 曲流河砂体.....	(21)
一、一般沉积机理及微相.....	(21)
二、曲流河砂体储层特性.....	(26)
三、曲流河砂体识别标志.....	(30)
第3节 网状河砂体.....	(31)
一、一般沉积机理和微相.....	(31)
二、储层特性.....	(33)
三、识别标志.....	(35)
第4节 河流砂体储层总述.....	(35)
第四章 三角洲砂体	(37)
第1节 鸟足状—叶状体三角洲.....	(39)
一、一般沉积机理.....	(39)
二、砂体储层特性.....	(41)
第2节 尖头状—弧形三角洲.....	(43)
一、一般沉积机理.....	(43)
二、砂体储层特性.....	(44)
第3节 港湾型三角洲.....	(45)
第4节 三角洲砂体储层总述.....	(46)
一、两类主要砂体.....	(46)
二、三角洲层序.....	(46)
三、三角洲的废弃和转移.....	(47)
第五章 沿岸——三角洲间环境的砂体	(49)
第1节 一般沉积机理.....	(49)
一、千尼尔平原的沉积过程.....	(49)
二、堡岛综合体的沉积过程.....	(50)
第2节 砂体储层特性.....	(51)
一、砂体几何形态与连续性.....	(51)
二、砂体层内非均质性.....	(51)

三、砂体平面非均质性·····	(51)
第 3 节 沿岸砂体的识别标志·····	(51)
第六章 海底扇砂体 ·····	(53)
第 1 节 一般沉积机理·····	(53)
第 2 节 岩石相组合·····	(55)
一、岩石相 A·····	(55)
二、岩石相 B·····	(57)
三、岩石相 C·····	(57)
四、岩石相 D·····	(57)
五、岩石相 E·····	(57)
六、岩石相 F·····	(57)
七、岩石相 G·····	(57)
第 3 节 亚 相·····	(58)
一、滑坡、供物河道及海底峡谷·····	(58)
二、上 扇·····	(59)
三、中 扇·····	(59)
四、下 扇·····	(59)
五、盆地平原·····	(59)
第 4 节 海底扇砂体储层特性·····	(59)
一、砂体几何形态与连续性·····	(59)
二、砂体层内非均质性·····	(60)
三、砂体平面非均质性·····	(60)
第七章 湖盆碎屑岩储层 ·····	(61)
第 1 节 湖盆的三角洲砂体·····	(61)
一、三角洲类型·····	(61)
二、扇三角洲砂砾岩体储层·····	(64)
第 2 节 湖盆碎屑岩充填型式·····	(67)
一、纵向冲积扇—辫状河—曲流河—三角洲平原—三角洲前缘—湖泊 (或湖底扇)充填型式·····	(67)
二、横向冲积扇—纵向辫状河(网状河)—三角洲—湖相充填型式·····	(67)
三、横向冲积扇—扇三角洲—湖底扇充填型式·····	(68)
四、横向冲积扇—辫状河—三角洲—湖底扇(湖相)充填型式·····	(69)
五、横向冲积扇—曲流河—小型三角洲—湖相充填型式·····	(69)
六、冲积扇—辫状河—砂坪—盐湖相充填型式·····	(69)
七、冲积扇—平原河流(辫状河、曲流河)—末端扇充填型式·····	(69)
八、三角洲间湖湾滩坝充填型式·····	(69)
第 3 节 湖盆碎屑岩储层性质的一些特殊性·····	(70)

第一章 碎屑岩储层地质研究内容

碎屑岩储层地质研究的内容很广泛,而且随着生产的需要,油田开发技术不断的发展提高和近代地质科学技术的进展,逐步在深入和扩大。在依靠天然能量开发油田的年代里,人们不会意识到单砂层对比的必要性。注水开发的实践,为了有效的提高注水波及体积,储层连续性首先受到油藏工程师的关注 促使储层地质研究突破了大层段、大平均的做法,进入了分层对比、油砂体研究的阶段。随着注水开发提高采收率和各种三次采油技术的研究和实践,人们愈来愈认识到更多的储层微观因素与开发效果和采收率密切攸关。当前,可以用这样一句话来概括:碎屑岩储层研究正在逐步从宏观向微观方向前进。

根据现阶段注水开发和三次采油技术的需要,碎屑岩储层地质研究内容应该包括从微观孔隙结构到宏观的一整套含油层系。归纳起来,有下述五个方面。可以设想,随着油田开发的进一步深入,还会发现更多的储层特性需要人们去研究和搞清它们。

第1节 微观孔隙结构

微观孔隙结构即指微观孔道内影响流体流动的地质因素。主要内容有孔隙、喉道的分布,粘土基质、砂粒排列的方向性等。这些直接影响注入流体驱替原油的效率高低,而且一般都必须在高倍显微镜下才能测定或观测。随着扫描电镜、图像分析仪等近代技术的发展,一些更精密的定量测定方法正在发展中。

一、孔隙、喉道分布

孔隙、喉道分布是指各种大小孔、喉的频率分布、均质程度以及孔喉比,孔喉配位数等孔喉网络的分布和连通情况,是储层微观孔隙结构的基本特征。

目前常用压汞法测得的汞—空气毛管压力曲线为基础,并统计一些基本参数来表征孔喉的分布特征,如:

喉道中值(r_{50}): 累计频率分布曲线上相应于50%的喉道值。

平均喉道半径(D_m):

$$D_m = \frac{D_{16} + D_{50} + D_{84}}{3}$$

喉道分选系数(S_p):

$$S_p = \frac{D_{84} - D_{16}}{4} + \frac{D_{95} - D_5}{6.6}$$

喉道相对分选系数(RS_p):

$$RS_p = \frac{S_p}{D_m}$$

喉道分布偏态(SK_p):

$$SK_p = \frac{D_{16} + D_{84} - 2D_{50}}{2(D_{84} - D_{16})} + \frac{D_5 + D_{95} - 2D_{50}}{2(D_{95} - D_5)}$$

上述计算方法同粒度参数,要把喉道半径换算为 ϕ 值进行,这些参数也有用矩值法计算。

峰值喉道半径:频率分布图上最大百分数值处的喉道半径。

最大喉道半径:相应排驱压力值(P_d)的喉道半径。

最大非流动喉道半径:贡献值趋近于零的喉道半径。

孔喉比、孔喉配位数等孔喉网络情况,要配合铸体薄片,扫描电镜等技术作出统计。

孔喉分布对驱油效率影响极大,而它本身直接受碎屑岩的粒度分布所控制。碎屑岩粒度分布常见的有单模态和双模态,我国研究砾岩储层的一些地质工作者,还提出了冲积扇砂砾岩储层应属于复模态的观点。一定的沉积环境和沉积作用下可以出现一定的粒度大小分布特征和模态型式,这就是沉积相研究储层孔喉分布的基础。

二、粘土基质

作为基质充填碎屑岩储层孔隙内的粘土矿物,包括碎屑的和自生的,由于其特殊的物理化学性质,特别是对各种注入流体的敏感性,对储层孔隙结构及其后期变化、对注入剂的选择和驱油效率以及改造储层的增产措施的选择都有直接影响,因此也是储层微观结构重要的内容之一。

粘土矿物所以如此重要,是由于:

1. 很高的表面负电荷,具有很强的离子交换潜力;
2. 粘土颗粒很小,它们有很大的表面积,具有很强的吸附能力;
3. 粘土矿物与原始油层流体通常处于平衡状态,当不同的流体进入时它们的平衡会遭受破坏,即所谓对流体的敏感性。

因此,在油田开发中粘土可能引起的储层问题有:

1. 水敏性,吸收注入水,物理地堵塞孔喉;
2. 在一定注入压力下可能打碎粘土,使之移动堵塞喉道;
3. 吸附注入剂,不仅减小渗透率,并改变注入化学剂的成分,致其失效。

由此可见,粘土矿物的类型、晶形、产状和分布都是需要认真加以搞清的。

当前,通常把砂岩孔隙中的粘土矿物产状分为三种:

1. 分散状:粘土矿物在孔隙中以散在的形式分布,对孔隙度和渗透率相对影响较小。
2. 薄层状:粘土矿物粘附于孔壁,形成一个相对连续的和薄的粘土矿物披盖,粘土晶体的排列可以平行或垂直于孔壁表面,对孔隙度—渗透率关系影响较大。
3. 搭桥状:粘土矿物粘附于孔壁表面伸长很远,整个横跨孔隙和喉道,象搭桥一样,孔壁之间的粘土互相连接起来,形成了很多的微孔和曲折的流体通道。这种形式对孔隙度—渗透率关系影响最大。

各类粘土矿物有其各自的特殊作用。如高岭石一般以分散状形式产出,易于被打碎而移动堵塞喉道。蒙脱石以薄层或搭桥状出现,有极大的水敏性,其体积膨胀足以完全破坏其水渗透率。伊利石一般以搭桥状产出,把粒间孔分隔为大量微孔,极大地减少渗透率,产生高束缚水饱和度,也具水敏性,柴油污染时很难解除。绿泥石可以以各种产状出现,盐酸处理时会形成氢氧化铁沉淀而使酸化无效。

三、砂粒排列的方向性

伸长砂粒排列的方向性直接导致渗透率的各向异性。不仅砂粒的组构引起方向性,从储层实际应用意义上讲,各种层理构造也是引起储层渗透率各向异性的重要原因。而渗透率各向异性的严重程度则是二、三次采油中必须注意的重要因素。

片状矿物的排列则影响垂直渗透率与水平渗透率的比值，是流体在储层内垂直串流的重要控制因素。

第2节 基础岩性和物性

储层的基础岩性和物性，是指岩石矿物组成，结构特征，以及孔隙度、渗透率、流体饱和度和基本油层岩石和物理性质，一般都是在数厘米规模的小柱塞样品和薄片内测定的，因此也可以把这些储层特征参数称为一个样品规模的影响流体流动的地质因素。

一、岩石学研究

这是碎屑岩储层的一项最基础的研究。从成因上说，岩性是“因”，油层物性则是“果”。要搞清直接影响流体渗流的油层物性的分布规律，必须从研究控制油层物性的基本岩性因素入手，而碎屑岩储层的岩性又受控于沉积作用和成岩作用。通过沉积相分析所以能深入了解油层各项物性的非均质性，也就是以岩石学研究作为媒介和基础。岩石学研究包括如下内容：

1. 碎屑岩储层结构研究。即粒度分析及派生的各项参数和分布型式，如颗粒圆度、球度和排列堆集型式等。

2. 显微镜下的岩石学研究。通常有矿物组成和定名分类，胶结物成分和胶结类型。对胶结致密的碎屑岩同时研究粒度分布等结构特征 原生孔隙和次生孔隙，孔隙演化的矿物学证据。微裂缝分布及其与矿物成分和胶结程度的关系。

二、油层物性

1. 孔隙度

孔隙度是储层储油能力的直接反映。应测定总孔隙度和有效孔隙度，并进行实际岩压条件下与地面释压条件下孔隙度的差值校正。

2. 渗透率

渗透率是储层产油能力的直接反映。应测定水平的和垂直的渗透率，尽可能建立两者之间的关系。沉积结构、构造复杂时，应测定不同方向的水平渗透率，求得渗透率的各向异性。

3. 饱和度

指储层原始含油（气）、水饱和度。除直接用特殊方法取岩心测定外，通常通过各种控制因素研究（一般是岩性和其它物性及含油高度）而掌握其分布规律。

三、岩石和流体相互联系的油层物理性质

通常以测定储层岩石润湿性、毛管压力曲线和相对渗透率曲线来表征。这已经不是单纯属于储层地质研究的范畴。地质师的任务是与油藏工程师一起，对储层进行分类，保证取得代表性的样品，去测定这些参数。在应用中选择好代表性的曲线，如不同沉积相带选用不同的毛管压力曲线和相对渗透率曲线，等等。

第3节 层内非均质性

层内非均质性是指一个单砂层规模其内部垂向上的储层性质变化。近年来大量的二、三次采油实践和油层物理、数值模拟研究表明，这是直接控制和影响一个单砂层储层层内垂向上注入剂波及体积的关键地质因素。从油藏工程角度分析储层层内非均质性主要指两大方

面：(1)层内最高渗透率段所处位置，即处在底部、顶部或中部，以及层内各段间渗透率的差异程度。(2)一个单砂层规模的宏观的垂直渗透率和水平渗透率的比值，是决定流体垂向串流的重要因素。这两方面的层内非均质性表现则又受控于很多地质特征，从储层地质和储层沉积学角度应重点研究下述一些内容。

一、粒度层序

即一个单砂层内部碎屑颗粒粒度大小在垂向上的变化，称粒度韵律性，它直接影响层内垂向上渗透率非均质性。向上变细者称正韵律，向上变粗者称反韵律，反复变化者称复合韵律。

各种沉积方式下沉积的碎屑岩储层具一定的粒度层序，这是储层沉积相的重要研究内容。

二、沉积构造的垂向演变

各种层理类型是碎屑岩的主要沉积构造。由于不同粒度纹层的产状和排列组合不同，影响渗透率垂向上的变化，也影响渗透率的各向异性。泥质纹层的存在和产状对水平和垂直渗透率更会有较大影响。而不同沉积相带上的碎屑岩储层，其沉积构造的演变是有一定规律可寻的。

其它沉积构造，如泥质层中大量垂直虫孔被砂粒充填时，则会明显改善其垂直渗透能力。

三、层内不稳定薄泥质夹层的分布

各种沉积环境下沉积的碎屑岩储层，其内部经常会沉积一些分布很不稳定，面积不大的泥质：粉砂质夹层，虽然厚度极小（经常以厘米或数十厘米计），但对流体流动仍起到不渗透或极低渗透率的隔层作用，因而对驱油过程影响很大，也是直接影响一个单砂层从顶到底宏观规模的垂直（或水平）渗透比值的关键因素。有时也可能直接遮挡注入剂段塞使之减低驱油效果。搞清碎屑岩储层内部这类泥质夹层的大小，出现频率和产状，并力图作出定量或半定量的估计，已成为当前储层沉积学研究的重点。

四、成岩作用引起的层内薄隔层

除泥质薄夹层外，成岩过程也可能产生各种层内薄隔层，对层内非均质性同样起到重要的作用。如各种胶结条带，如硅质、钙质、高岭土胶结等；强压实引起的颗粒缝合线等。对这类成岩隔层要掌握和预测其分布规律更为困难。

五、重油、沥青充填条带

由石油运移过程中产生的沥青或重油充填条带，也同样起到层内薄隔层的作用。

六、压实、滑动引起的微裂缝

各种层内规模（不串层）的微裂缝会扩大某一方向渗透率，改变流体在层内的渗流特征。

当然，上述最后三方面的内容，已不属沉积作用所控制，但实际工作中仍常常可以发现与储层岩性有一定联系。

层内非均质性，最终体现在层内渗透率差异上。当前，通常用一些统计指标来反映渗透率非均质程度。如渗透率变异系数，渗透率级差（最大渗透率/最小渗透率）和突进系数（最大渗透率/平均渗透率）等。

第4节 平面非均质性

储层平面非均质性是指一个砂岩体的几何形态以及砂体内孔隙度, 渗透率的空间变化所引起的非均质性。也就是指单个砂岩体规模的整体宏观研究, 直接关系到注入剂的平面波及效率, 其主要内容如下述。

一、砂体几何形态及各向连续性

砂体几何形态的地质描述, 一般以长宽比分类。

席状砂体, 长宽比近于1:1, 平面上呈等轴状。

土豆状: 长宽比 $\leq 3:1$

条带状: 长宽比 $> 3:1 \leq 20:1$

鞋带状: 长宽比 $> 20:1$

砂体几何形态是砂体各向大小的相对反映, 而决定井网型式和密度的关键因素则是各向连续性的实际大小, 一般重点是研究侧向连续性(即砂体短轴方向的连续性)。通常以砂体实际延伸长度(或宽度)表示。对于已有一定密度的井网时, 可以相对于既定(或预定设计)井距之比表示, 即砂体宽度/井距; 也可以用已定井网之比控制程度(百分率)表示。

通过沉积相预测和估计砂体几何形态及其各向连续性, 是储层沉积学初期兴起时之主要目的。当前已愈益向定量预测方向发展。

二、砂体连通性

各种成因单元的砂体在垂向上和平面上相互接触连通, 进一步扩大了储层的连续性, 这是研究平面非均质性的一个重要内容。描述内容有: 砂体配位数(与某一个砂体连通过接触的砂体数); 连通程度(也有称接触程度, 指连通体部分佔砂体面积的百分数); 连通体大小(一个连通体内包括多少个成因单元砂体); 等等。

连通后形成的复合砂体, 沉积学上以多边形(即侧向上相互连通为主)和多层式(或称叠加式, 即垂向上相互连通为主)命名之。未与其它砂体连通者称孤立式砂体。

成因单元间砂体的连通程度受控于沉积速率, 盆地沉降速率等地质条件, 这是研究大地构造活动与沉积作用关系中的一个重要内容。

三、砂体内渗透率、孔隙度平面上的变化

砂体内渗透率、孔隙度平面上的变化即通常所说的渗透率(孔隙度)非均质性, 它受控于砂体沉积时各部位水动力能量的差异。研究的重点是渗透率方向性, 它对流体的平面运动影响极大。渗透率的方向性可分为:

宏观渗透率方向性: 指砂体内岩性变化引起的方向性。如主体带与边缘带的差别; 沉积时高能带与低能带的差别等等。也有把砂体几何形态引起的方向性归入宏观渗透率方向性。

微观渗透率方向性: 指砂体内沉积构造和结构因素引起的渗透率方向性, 一般弱于前者, 但对一些类型沉积砂体可能会出现相当强烈的微观渗透率方向性。

四、裂缝引起的渗透率方向性

储层存在裂缝时, 将会导致严重的渗透率方向性。常见的是构造作用产生的构造缝, 但与沉积作用有关的层面缝(层理缝)也经常有所发现。如高流态条件下产生的砂体中的平行层理, 已大量发现常是引起注入水高速串流的通道。

第5节 层间非均质性

即一套砂、泥岩间互的碎屑岩的总体研究，属于层系规模的储层研究。层间非均质性是决定开发层系、分层开采工艺技术等重大开发战略的依据。从储层沉积学观点，则受控于沉积环境和沉积作用的历史演变，即沉积旋迴性。

沉积旋迴性决定了砂体在剖面上发育程度的变化，各种环境的砂体（也就是不同特性的砂体）在剖面上交互出现的规律性，作为隔层的泥质岩类的发育和分布规律，这些都是储层层间非均质性的主要内容，具体如下述。

一、分层系数

指一定层段内砂层层数的多少，即砂层分散程度，以平均单井钻遇砂层层数表示。一般来说，分层系数愈大，表明层间非均质性愈严重。

二、各砂层间渗透率的差异

即层间渗透率非均质程度。实际工作中也常以各种统计指标表示。如渗透率分布型式，单层突进系数，变异系数等。

三、主力油层与非主力油层在剖面上的配置关系

主力油层的相对集中与分散，在层系剖面上所处的位置，也是决定开发措施需要注意的依据。特别要注意识别特高吸水层的分布，即所谓“贼层”的位置，及其地质成因，才能有针对性地加以处理。

四、层间隔层

层间隔层条件是储层层间非均质性的另一重要侧面。碎屑岩储层中的隔层以泥质岩类为主，也包括少量蒸发岩和其它岩类。

泥质岩在剖面上的分布，层厚与平面上的连续性，与不同特征砂层的组合关系是研究隔层的主要内容。实际工作中一般以等厚图表示，也可以不同等级厚度所佔井数的分布频率表示。

五、构造裂缝

构造裂缝在不同岩性、厚度储层中的不同产状、密度，会极大地改变储层之间非均质性。泥质隔层的岩石力学性质影响构造裂缝的穿层程度，也就影响层间的隔绝条件。

不仅要研究可见裂缝的规律，还要特别注意潜在裂缝的特点和分布。潜在裂缝不仅会在钻井取心中给人以假象，更重要的是在一定压力条件下会转化为开启裂缝而发生流体串流。

六、小结

从本节上述五个方面内容不难看出，储层地质研究总的目的，就是为了搞清油田开发过程中流体藉以储存和运动的地下通道的原始面貌。至于每项储层特性在油田注水开发或三次采油中怎么样影响流体的运动，已是渗流力学和油藏工程问题，不是本书的任务。

这些内容也不是油田一经发现或一投入开发就需要和能够一次认识清楚的，而只能是随着勘探和开发的逐步进展不断加深认识。但是，作为油田开发地质工作者，在油田发现之后就应该和地球物理师和油藏工程师一起，带着这些问题去研究和评价储层。

还应该指出的，上述部分内容，特别是一些微观特性，目前的沉积学基础和水平，还不可能合理地给以解释和预测，这些也正是今后结合其他学科综合攻关的内容。因此，本书也只涉及当前储层沉积学中比较成熟的部分。

第二章 冲积扇砂砾岩体

第1节 一般沉积机理

冲积扇 (Alluvial fans) 通常是沿着一定高差的山脉发育的。山区河流进入山麓平原, 在出山口处由于坡降突然变小, 流速与水流能量随之降低, 大量碎屑物在山口堆积成一个扇形沉积体, 即为冲积扇。

冲积扇的特点是: 直接沉积于邻近剥蚀区; 在碎屑岩沉积中是最高能量搬运的沉积物; 碎屑物以砾石为主, 粒级范围大, 从巨砾到泥都可沉积, 搬运和沉积的间歇性很大; 坡降较大, 平均 5° , 变化于 $<1^\circ$ — 25° , 一般很少超过 10° 。

碎屑物从山区向冲积扇搬运有两种形式: 河流水携搬运和泥石流搬运。

一、河流水携搬运

河流水携搬运产生三种沉积物。

1. 河道沉积 (Stream channel deposits)

切入冲积扇的河道从扇首到扇底呈放射状散开, 一次洪泛事件通常仅一条或几条河道活动, 大多数是废弃的。河道的移动、改道、充填和废弃, 就是沉积过程。冲积扇上河道的河型一般属辫状河。河道形状多变, 由于互相截切而很难辨认原形。河道底部常有滞留沉积物, 切割——充填构造常见。河道沉积物呈透镜状, 为分选很差的砾石和砂。砾石可显叠瓦状, 砂可能呈交错层理。河道沉积在扇根和扇中部分佔重要地位。

2. 漫洪沉积 (Sheet flood deposits)

是洪水溢出河道在冲积扇上形成宽而浅的漫流沉积物。沉积物成席状, 由很多砾石和砂透镜体条带组成。沉积物比河道沉积要细; 细粒碎屑物增多, 分选相对较好, 出现交错层理、平行层理, 细粒砂中也有波痕层理, 砾石叠瓦状排列较发育。

3. 筛积物 (Sieve deposits)

当水流由于某种原因很快减弱时, 从较老的粗碎屑沉积物隙间渗滤流动, 把砾石间的细粒碎屑物带走, 形成了碎块支撑的砾石层, 或称开启骨架砾石层 (Open framework gravel), 这种沉积物即为筛积物, 以具有特高的渗透率在储层中出现。形成筛积的原因说法不一, 但这一种沉积物在实际冲积扇储层中是存在的。

二、泥石流搬运

泥石流 (Debris flow) 形成于短期很突然的剧烈洪泛, 是沉积物和暴雨降水混合, 由重力作用引起的块体流动。大小不一、分选很差的砾石由细粒碎屑物支撑着向下搬运。始发于较大的坡度, 形成后则由于其高密度可以在较缓的坡降上搬运一定的距离。泥石流沉积物分选甚差, 可包括巨砾、中砾和很细的基质, 砾石杂乱无定向排列, 不成层, 具突变边界。

当基质中泥质含量较高时而粗碎屑较少时, 则称泥流 (Mud flow)。

泥石流沉积一般不厚, 通常几十厘米, 但由于其沉积物是泥质砾岩或砾状泥岩, 从储层意义上是属于不渗透隔层, 它的存在复杂了冲积扇砂砾岩体储层的非均质性, 降低了扇体的