



成都理工大学
能源学院
60周年校庆文集

CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
COLLEGE OF ENERGY
THE 60TH ANNIVERSARY

点源函数和边界元法

求解油藏渗流问题

李成勇 刘启国 周 珺 李明军 著



科学出版社

点源函数和边界元方法求解 油藏渗流问题

李成勇 刘启国 周 珺 李明军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于渗流力学的基础理论描述了不同类型的复杂油气藏的渗流数学模型建立过程；利用点源函数和拉普拉斯基本原理理解了均质砂岩、低渗透油气藏、应力敏感油气藏、裂缝和缝洞发育的碳酸盐岩油气藏以及考虑吸附解吸的页岩、煤岩气藏直井、压裂井、部分射孔井、水平井的井底压力响应数学模型，分析了相应的井底压力响应特征；同时利用Green函数求解出各种复杂油气藏直井、压裂井、部分射孔井的边界元基本解，解决了复杂外边界和严重非均质油气藏的渗流问题；同时通过三个现场实例，详细介绍了渗流力学在油气藏工程中的应用，为渗流力学的进一步发展起到抛砖引玉的作用。

本书可供从事油气开采及油气渗流理论技术研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

点源函数和边界元方法求解油藏渗流问题 / 李成勇等著. —北京：科学出版社，2016.7

ISBN 978-7-03-049432-0

I. ①点… II. ①李… III. ①点源-源函数-数学模型-应用-油气藏渗流力学-研究②边界元-数学模型-应用-油气藏渗流力学-研究 IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 169081 号

责任编辑：杨 岭 郑述方 / 责任校对：韩雨舟

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

*

2016年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016年7月第一次印刷 印张：10

字数：250千字

定价：68.00元

前 言

目前求解油藏渗流微分方程的数学手段主要有分离变量法、积分变换法、点源函数法、拉普拉斯变换法等。随着石油工业的发展,有利的含油气盆地和已开发的油气田都进入了勘探开发高成熟期,勘探工作逐步转向地处偏远、自然条件恶劣的地区,其中大部分为低渗透、超低渗、应力敏感、双重节奏、三重介质、考虑解析吸附影响的油气藏,且大斜度井、丛式井、水平井、多分支水平井的应用越来越广泛。上述复杂油气藏、复杂结构井的井底压力响应数学模型必须采用点源函数法求解。作者从2001年开始接触点源函数和边界元,经过近15年的潜心研究和技术沉淀最终形成了《点源函数和边界元方法求解油藏渗流问题》一书。本书适合用作石油工程相关专业本科生和研究生的教材,也可以作为广大石油科技工作者的参考资料。

多名老师和硕士研究生参与了本书的编写,西南石油大学刘启国教授从2001年开始一直指导本人的科研工作,书中的井底压力响应模型和计算机求解程序大部分是在刘教授的指导和帮助下完成的;中石化石油工程研究院周珺博士参与了边界元模型的部分推导工作;中海油湛江分公司李明军博士参与了复杂油藏渗流公式的推导;成都理工大学陈克勇博士参与了本书第一章的编写工作;中国地质大学(武汉)蔡建超博士参与了本书第五章的编写工作;中石化西北局工程技术研究院王洋同志完善了点源函数求解低渗透油藏渗流问题部分的理论研究工作;中石化华北局工程技术研究院熊佩同志完善了点源函数求解应力敏感油藏渗流问题部分的理论研究工作;中石油大庆油田采油工艺研究院杨志刚、刘云完善了点源函数求解三重介质油藏渗流问题部分的理论研究工作;中海油天津分公司研究院宫平志完善了点源函数求解煤层气藏渗流问题部分的理论研究工作,此外成都理工大学能源学院研究生罗毅、梁海鹏、本科生杨静、刘沙参与了本书的排版和图形清绘工作。

本书完成后成都理工大学伊向艺教授、西南石油大学张烈辉教授提出了宝贵的修改意见,成都理工大学能源学院对本书的出版给予了大力支持,同时,本书的出版还得到了“页岩储层原始地应力场仿真与局部人工扰动规律研究”(基金号:51304032)的联合资助,在此表示深深的感谢!由于作者的水平有限,其中不免有不当和错误之处,诚请读者和同行提出宝贵的批评和建议。

李成勇

2016.4.16

目 录

第一章 渗流力学基础理论	1
第一节 不同类型油气藏孔隙结构特征	1
一、砂岩储层孔隙结构特征	1
二、碳酸盐岩油藏孔隙结构特征	2
三、煤层气藏孔隙结构特征	3
四、页岩气藏孔隙结构特征	5
第二节 复杂油气藏渗流实验方法	6
一、达西渗流实验	6
二、卡佳霍夫渗流实验	6
三、启动压力梯度实验	7
四、应力敏感实验	9
五、微观可视化渗流实验	10
六、三维数值可视化仿真实验	11
第三节 不同类型油气藏渗流数学模型建立	12
一、均质砂岩油藏渗流数学模型	12
二、低渗透油藏渗流数学模型	16
三、应力敏感油藏渗流数学模型	17
四、裂缝发育的碳酸盐岩油藏双重介质渗流数学模型	19
五、溶洞发育的碳酸盐岩油藏三重介质渗流数学模型	22
六、考虑解吸吸附的页岩、煤层气藏渗流数学模型	24
第四节 拉普拉斯变换法求解渗流数学模型及主要问题	27
一、均质无限大油藏拉普拉斯空间解	27
二、拉普拉斯法及点源函数法的优缺点	31
第二章 利用点源函数求解均质油藏不稳定渗流问题	32
第一节 均质无限大空间瞬时点源函数基本解	32
第二节 考虑顶底边界的瞬时点源函数基本解	33
一、顶底封闭边界的瞬时点源函数基本解	33
二、顶底混合边界的瞬时点源函数基本解	35
三、顶底定压边界的瞬时点源函数基本解	38
第三节 均质油藏直井井底压力响应函数	38
一、均质油藏直井井底压力响应函数	38

二、井底压力函数的数值计算	40
三、均质油藏直井井底压力响应特征	41
第四节 均质油藏部分射孔井井底压力响应函数	43
一、均质油藏部分射孔井井底压力响应函数	43
二、均质油藏部分射孔井井底压力响应特征	46
第五节 均质油藏水平井井底压力响应函数	49
一、均质油藏水平井井底压力响应函数	49
二、均质油藏水平井井底压力响应特征	51
第六节 均质油藏压裂井井底压力响应函数	53
一、无限大油藏压裂井井底压力响应函数	53
二、径向封闭油藏压裂井井底压力响应函数	54
三、考虑不对称缝井底压力动态响应数学模型	55
四、压裂水平井井底压力响应数学模型	56
五、均质油藏压裂井井底压力响应特征	56
第七节 规则边界叠加方法	60
一、一条直线边界	60
二、 60° 夹角边界	60
三、直角边界	61
四、 120° 夹角边界	61
五、平行直线边界	61
六、三条直线边界	62
七、矩形边界	63
第八节 特征点特征线解释方法	64
一、纯井筒储存分析	64
二、局部径向流分析	64
三、系统径向流分析	65
四、球形流分析	65
五、双线性流分析	65
六、线性流分析	66
七、拟稳态流分析	66
第三章 利用点源函数求解复杂油藏不稳定渗流问题	67
第一节 利用点源函数求解低渗透油藏不稳定渗流问题	67
一、低渗透油藏瞬时点源函数基本解	67
二、低渗透油藏井底压力响应函数	68
三、低渗透油藏井底压力响应特征	70
第二节 利用点源函数求解应力敏感油藏不稳定渗流问题	72
一、应力敏感油藏瞬时点源函数基本解	72
二、应力敏感油藏井底压力响应函数	73

三、应力敏感油藏井底压力响应特征	76
第三节 利用点源函数求解双重介质油藏不稳定渗流问题	77
一、双重介质油藏瞬时点源函数基本解	77
二、双重介质油藏井底压力响应函数	78
三、双重介质油藏井底压力响应特征	81
第四节 利用点源函数求解三重介质油藏不稳定渗流问题	83
一、三重介质油藏瞬时点源函数基本解	83
二、三重介质油藏井底压力响应函数	84
三、三重介质油藏井底压力响应特征	87
第五节 利用点源函数求解煤层或页岩气藏不稳定渗流问题	92
一、考虑解吸扩散的瞬时点源基本函数	92
二、考虑解吸扩散的井底压力响应函数	93
三、考虑解吸扩散的井底压力响应特征	93
第四章 点源函数和边界元求解油藏渗流问题	99
第一节 点源函数和边界元求解复杂外边界油藏渗流问题	99
一、复杂外边界油藏边界元积分方程	99
二、复杂外边界油藏边界元积分方程的求解	100
三、边界积分方程求解过程中的注意点	102
四、复杂外边界油藏边界元积分方程的基本解	104
五、复杂外边界油藏井底压力响应特征	105
第二节 点源函数和边界元求解复杂外边界非均质油藏渗流问题	108
一、复杂外边界非均质油藏边界积分方程	108
二、复杂外边界非均质油藏边界积分方程的求解	111
三、复杂外边界非均质油藏边界积分方程基本解	112
四、复杂外边界非均质油藏井底压力响应特征	115
第五章 渗流力学在油藏工程中的应用	119
第一节 渗流力学在地下流体运动规律识别中的应用	119
一、利用特征线解释方法分析地层渗透的数学模型	119
二、平均渗透率与压力波波及前缘渗透率关系	120
三、利用注 CGD 井试井测试资料分析油藏 CGD 推进位置分析方法	120
四、现场应用	121
第二节 渗流力学在确定低渗透油藏极限技术可采井距中的应用	123
一、直井、压裂井、水平井、缝网压裂水平井地层压力分布函数	123
二、直井、压裂井、水平井、缝网压裂水平井有效压力驱替系统论证	125
第三节 渗流力学在低渗透油藏超前注水关键参数优化中的应用	127
一、低渗透油藏渗流数学模型	127
二、低渗透油藏超前注水和投产阶段地层压力分布	129

三、低渗透油藏超前注水关键参数优化	131
四、应用实例	133
参考文献	136
附录	139
索引	151

第一章 渗流力学基础理论

流体通过多孔介质的流动称为渗流(周晓军, 2008; 邓平平, 2014; 刘俊丽等, 2015)。多孔介质是指由固体骨架和相互连通的孔隙、裂缝或各种类型毛细管所组成的材料(罗莹莹, 2007)。渗流力学就是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。它是流体力学的一个重要分支, 是流体力学与岩石力学、多孔介质理论、表面物理、物理化学以及生物学交叉渗透而形成的。

第一节 不同类型油气藏孔隙结构特征

储集岩的孔隙结构特征是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系, 对于碳酸盐岩来说其孔隙结构主要是指岩石具有的孔、洞、缝的大小、形状及相互连通关系(陈杰等, 2005; 方小洪, 2006)。储集层岩石的孔隙结构特征是影响储层流体(油、气、水)的储集能力和开采油、气资源的主要因素, 因此明确岩石的孔隙结构特征是发挥油气层的产能和提高油气采收率的关键。

一、砂岩储层孔隙结构特征

砂岩储层孔隙类型多样, 成岩溶孔、原生粒间孔与微孔隙等共存, 且喉道细小, 孔喉组合类型主要以中孔微喉和小孔微喉型为主, 孔隙间的连通性很差(陈博, 2014)。砂岩油藏中油气的储集和渗流空间均为孔隙。对于纯孔隙结构砂岩储层, 由于孔隙大小分布是随机而不规则的, 其对油气渗流的影响也极难预测, 为此, 人们提出了种种模型来简化这种储层结构。

最早的简化模型是把岩石看成是由等直径的圆球颗粒组成的, 流体在这些圆球的间隙中储集和流动, 这种结构模型称为“假想结构模型”; 进一步的简化是将岩石中连通的孔道看成等直径毛细管, 岩石由这些等径毛细管束所组成(图 1-1), 因而可以把一般管道的水动力学运动规律引入到渗流力学中。这种简化模型称为“理想结构模型”。显然, 这种假设与实际情况还有很大差距, 因为实际孔道既不是等径的, 也不是直的。人们进一步作了修正, 引入了变直径的、弯曲的毛细管束模型(图 1-2), 称其为“修正理想模型”。



图 1-1 砂岩储层孔隙图

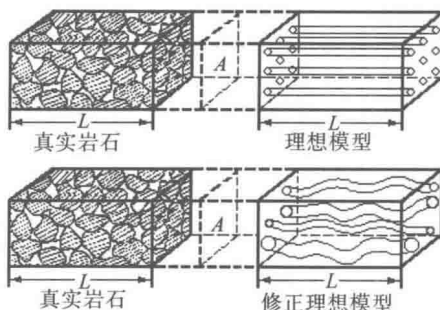


图 1-2 孔隙性储层及其简化模型示意图

这种修正模型可以用于一般渗流规律的研究。事实证明, 这些简化模型对渗流力学的研究都非常有意义。

二、碳酸盐岩油藏孔隙结构特征

碳酸盐岩储层中岩石为生物、化学、机械综合成因, 其中化学成因起主导作用(王小芬, 2011)。岩石化学成分、矿物成分比较简单, 但结构构造复杂。岩石性质活泼、脆性大。成岩作用和成岩后生作用严格控制储集空间发育和储集类型形成, 储层非均质程度高。在致密的碳酸盐岩或泥岩类油气层中(图 1-3), 基质孔隙度和渗透率都非常低, 基本上不具有储渗性(刘红岐等, 2012)。其油气的储存空间和流动通道主要为岩石破裂形成的裂缝系统, 故称为“纯裂缝结构”。由于裂缝特殊的长条形态及组系结构, 这种储集空间常用规则的网格进行简化(图 1-4), 简化的储层岩石被分割成多个立方体。

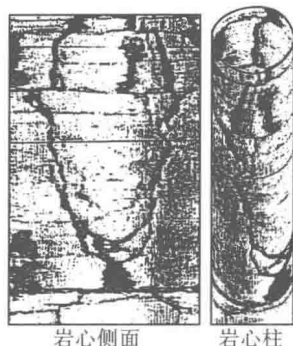


图 1-3 裂缝性储层岩心图

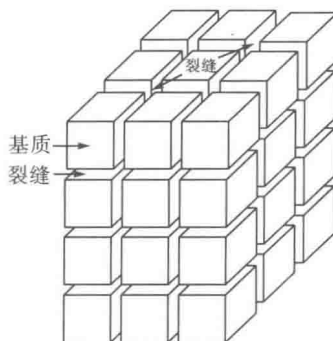


图 1-4 裂缝型储层简化模型

裂缝-孔隙结构简称缝-隙结构, 是双重介质中的一种(李晓平, 2007)(参见图 1-5)。这种结构主要出现在裂缝、溶孔同时发育的碳酸盐岩储层中, 在石灰岩、白云岩油气层中最为常见。四川碳酸盐岩气田中普遍存在这种双重介质储层。此外, 在某些砂岩油气藏中, 构造局部(如弯曲度较大的构造顶部)因构造应力的作用而产生大量裂缝后, 也可能出现孔隙-裂缝双重介质结构。需要注意的是, 由于构造变形的影响, 不少砂岩储层都发育有裂缝, 只是裂缝的大小和规模对油气的储渗影响甚微, 这种情况下, 就不能视其为双重介质。流体在这种双重介质中渗流会形成两个渗流场: 基质孔隙介质中的流场、裂缝介质中的流场。流体在这种储层中流动时, 两种介质之间会发生流体交换。因而, 裂缝-孔隙介质的特点是: 存在双重孔隙度、双重渗透率和两个水动力学场。裂缝-孔隙介质简化模型为纯孔隙介质与纯裂缝简化模型的组合(图 1-6)。

溶洞-孔隙结构简称洞-隙结构, 也属双重介质中的一种。这种介质结构通常出现在有大型溶洞发育的碳酸盐岩油气层中, 如前面介绍的塔河油田奥陶系灰岩储层, 其溶洞的大小平均达 5.0 m。因此, 在这种双重介质储层中, 流体在两种介质中的流动规律不同。在孔隙介质中, 流体的流动属于渗流范畴; 而在大的溶洞中, 流体的流动不属于渗流范畴, 其运动规律应遵循 Navier-stokes 方程。对这种流体流动服从两种流动规律的介质的简化, 最简单的方法是把大小不等、形状不规则、分布杂乱的洞穴, 简化为均匀分布在孔隙介质中大小相等的连通圆球(图 1-7)。

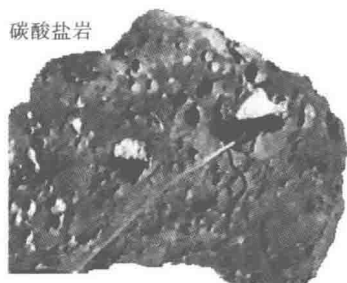
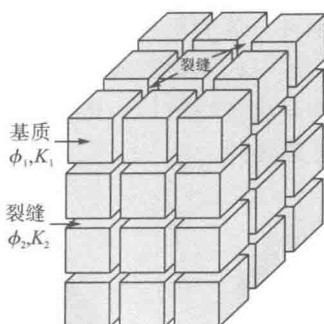
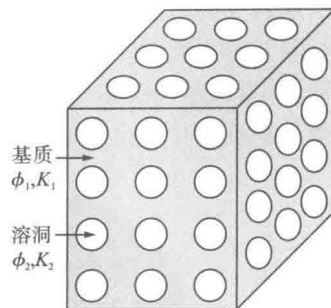


图 1-5 碳酸盐岩储层溶洞

图 1-6 裂缝-孔隙型储层
简化模型图 1-7 溶洞-孔隙型储层
简化模型

裂缝-溶洞结构简称缝-洞结构,属双重介质中的一种(王俊光,2007)。这种储层的储集空间不仅是双重的,且流体在每种介质中的流动规律也不相同。在裂缝介质中流体的流动属于渗流范畴,而在溶洞中的流动不属于渗流范畴,其流动规律应遵循 Navier-stokes 方程。裂缝-溶洞储层的简化模型为裂缝简化模型与溶洞简化模型的组合(李晓平,2007)。

溶洞-裂缝-孔隙结构简称洞-缝-隙结构。这种结构是三种单纯介质(孔隙、裂缝和大溶洞)组合在一起的混合结构,发育于碳酸盐岩油气层中。目前,油气在这类储层中的渗流规律研究甚少,还处于探索阶段。

三、煤层气藏孔隙结构特征

煤层气是非常规天然气资源中的重要组成部分,煤岩储层中发育着大量的孔隙和割理系统(李志伟,2015),具有孔隙-裂缝双重孔隙结构特征(图 1-8)。基质块内表面是煤层气的主要储集空间,块内微孔和割理提供主要的渗流通道。

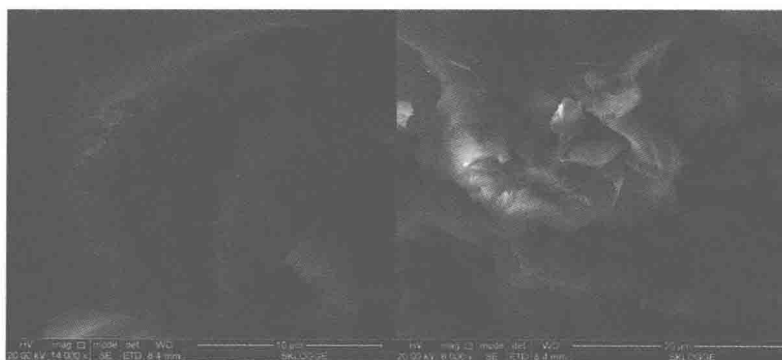


图 1-8 扫描电镜下的煤岩孔隙特征

煤层基质中的孔隙体积与煤阶密切相关,低阶时孔隙体积较大,大孔道占主要地位;高煤阶时孔隙体积小,小孔道占主要地位。煤层的孔隙尺寸比一般的油气藏要小得多。孔隙尺寸大致可分为三类:大孔($>20\text{ nm}$),中孔($2\sim20\text{ nm}$),微孔($<2\text{ nm}$),大孔通常是指割理-裂缝系统。也正是因为煤的孔隙度低,导致比表面积极大,所以对甲烷有着极强的吸附能力,使煤层气的含量远远超过其自身孔隙的容积。

煤岩中的天然裂缝又称作割理，煤的割理分为面割理和端割理。延伸较长的为面割理，与其垂直的为端割理，端割理与面割理形成了近似正交的裂隙网格是煤层气主要运移通道(李成全，2006)。割理间距比较均匀，从几毫米到几厘米。图 1-9 和图 1-10 分别为煤岩割理照片和微割理扫描电镜图片。

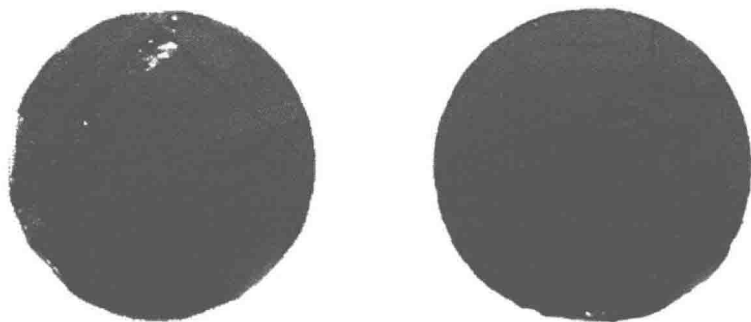


图 1-9 煤岩割理剖面

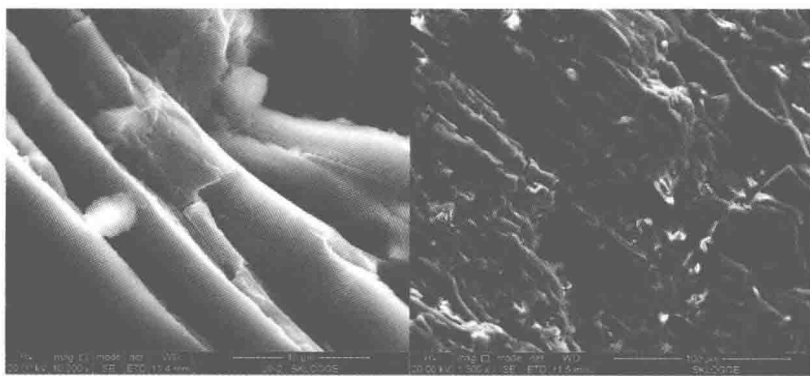


图 1-10 扫描电镜下的煤岩微割理特征

煤层渗透率通常较小，一般以毫达西为单位，具有明显的各向异性，流体优先沿着分布广泛、延伸长、连通性强的面割理流动。面割理渗透率要比端割理渗透率高几倍至几十倍。

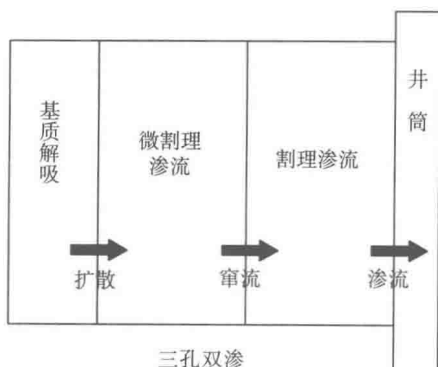


图 1-11 煤层气解吸-扩散-渗流示意图

在原始煤层气藏中，通常地层压力高于临界解吸压力，煤层气处于平衡的吸附状态(张冬丽和王新海，2005)。在煤层气开采过程中，地层压力不断下降，当压力下降到临界解吸压力以下时，煤层气开始从煤基质表面解吸出来(张磊等，2015)，原始的平衡状态被打破，引起煤储层中气体的流动，煤层气的运移可分为基质孔隙内表面解吸-扩散、微割理(或大孔道)和割理中的渗流三个过程(蔺景德，2012)，如图 1-11 所示。

四、页岩气藏孔隙结构特征

常规气藏中,页岩是良好的源岩或盖层。而在一些特殊的沉积构造中,页岩层有着“自生自储”的能力,当储层的储量形成一定的规模,同时具有了商业开发价值时,也就形成了我们所关注的页岩气藏(蒲泊伶,2008)。总体来说,页岩气藏的特殊性主要体现在气藏存储特征及产气机制方面。

页岩气藏中的天然气以游离气和吸附气并存。除游离态的天然气外,页岩中的孔隙结构比表面积较大,有利于天然气在孔隙表面的吸附,所以吸附态天然气也成为页岩气藏中重要的存在形式。页岩气藏的存储空间包括基质孔隙与裂缝两种。这主要是由页岩层自身的特征所决定的。在页岩气藏中,气体的运移不仅包括微小基质孔隙中达西流动和扩散,还包括吸附态天然气的解吸作用(席境阳和周晓玲,2012)。

所以当页岩气藏投入开发后,早期的页岩气是以游离态天然气为主,而进入开发的稳定期后,页岩气主要来自孔隙中的游离态天然气以及通过解吸作用产出的吸附态天然气。

根据工区内完钻井测井解释成果,宁201、203、208、210、211、212井天然裂缝均不发育;宁203、210、211井局部发育钻井诱导缝;宁209储层高导和高阻裂缝零星发育;宁212井见7条高导缝,5条高阻缝,1条诱导缝,2条微断层,孔隙类型以基质孔隙为主。

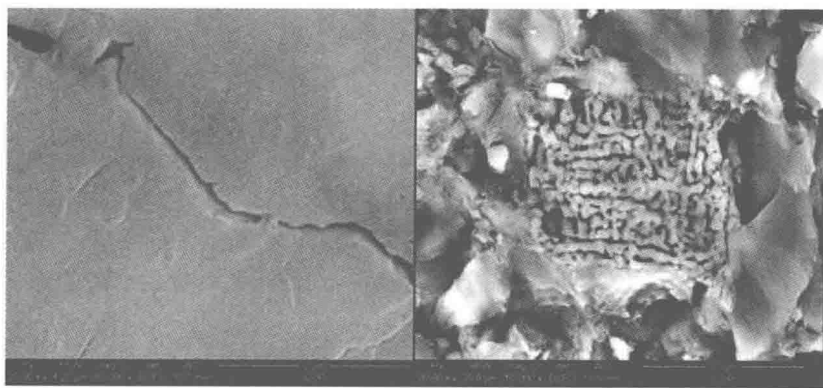


图 1-12 微裂缝古生物化石孔隙

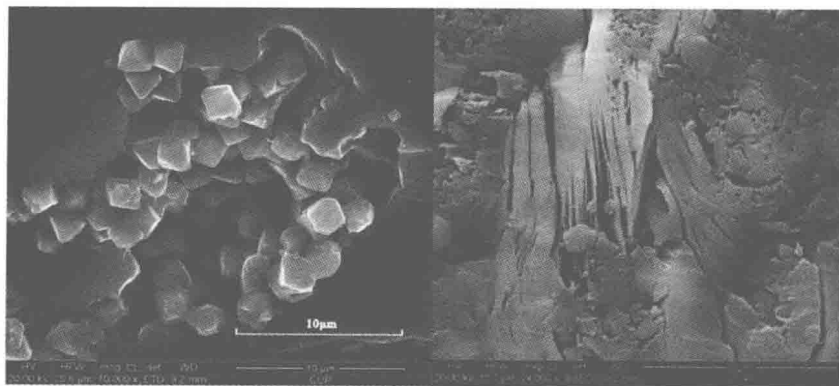


图 1-13 岩石骨架矿物孔隙黏土矿物粒间孔

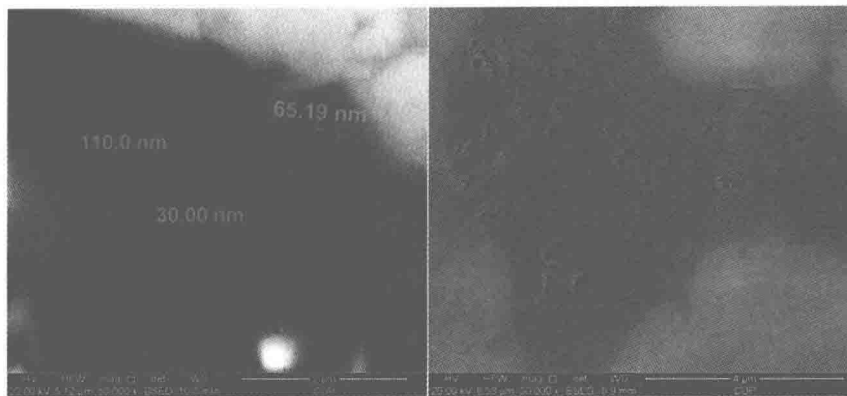


图 1-14 有机质纳米孔

根据宁 201 井岩心薄片鉴定分析资料, 宁 201 井龙马溪组地层成岩作用中压实作用相对普遍, 个别样品可见石英次生加大现象, 水平纹层发育, 部分样品见溶蚀缝, 面孔率小于 0.1%。根据扫描电镜镜下观察, 龙马溪组页岩气藏孔隙类型以基质孔隙为主。以宁 201 井为例, 镜下可见岩石含泥质较重, 泥质一般呈片状、纹层状分布, 孔隙类型以泥质片间隙、云母片间隙等微孔隙为主。部分样品可见微裂缝被碳酸盐岩完全充填。

第二节 复杂油气藏渗流实验方法

一、达西渗流实验

达西定律是研究多孔介质渗流问题的最基本的实验定律, 经典的渗流力学理论以至现代渗流力学理论几乎全是以达西定律为基础的(熊佩, 2011)。

在达西实验中, 当流体是微可压缩的液体时, 达西定律的数学描述如下:

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta p}{L} \quad (1-1)$$

式中, Q ——流量, cm^3/s ; A ——渗流横截面积, cm^2 ; μ ——流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; k ——渗透率, μm^2 ; L ——两渗流截面间的距离, cm ; Δp ——两渗流面间折算压力差, $\Delta p = p_1 - p_2$, 10^{-1} MPa ; p_1 、 p_2 ——岩样入口端和出口端的压力, MPa 。

在达西渗流中, 当水运动的速度和加速度很小时, 其生产的惯性力远远小于由液体黏滞性产生的摩擦阻力, 这时黏滞力占优势, 水的运动是层流, 渗流服从达西定律; 当水运动速度达到一定程度, 惯性力占优势时, 由于惯性力与速度的平方成正比, 达西定律就不再适用了(徐云龙, 2014)。

二、卡佳霍夫渗流实验

判断渗流是否服从达西定律, 可用渗流雷诺数加以判断(孙焕泉, 2005): 雷诺数 Re 和阻力系数 f 的双对数关系曲线, 流体在多孔介质中的流动存在三个不同的区域。

(1)层流区: 此时 Re 较小, 渗流的速度比较低, $f \sim Re$ 关系曲线是一条斜率为-1

的直线,在此区内黏滞力起主要作用,达西定律成立。

(2)过渡区:随着渗流速度的增大,亦即雷诺数的增大。在该区的下部,从黏滞力起主要作用的层流状态逐渐过渡为惯性力起支配作用的另一层流状态。而在该区的上部,流动则逐渐变为紊流,该区域达西定律不适用。

(3)紊流区:当渗流速度增大到某一个值后,即 Re 达到某一值后, $f \sim Re$ 关系曲线是一条水平直线,流态为完全紊流,该区域达西定律不适用。

从图 1-15 中可知,达西定律仅在层流区域($Re < 10$)适用。

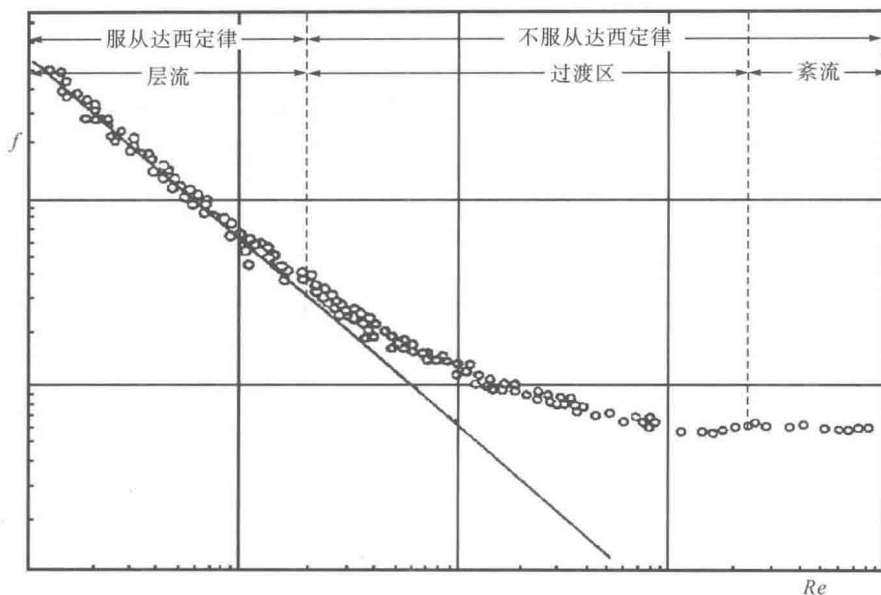


图 1-15 $f \sim Re$ 关系曲线图

三、启动压力梯度实验

低渗透油藏是指孔隙度较低、渗透性较差的原油储集层。流体在低渗透油藏中的流动明显区别于中、高渗透性油藏中的渗流,最本质也是最明显的一点就是其中的流动规律不再符合经典的渗流规律——达西定律。

1. 束缚水饱和度下油驱启动压力梯度实验

实验流程见图 1-16。实验温度 70°C , 原油黏度 $0.811 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 油的密度 0.802 g/cm^3 。启动压力梯度实验步骤如下。

- (1) 将岩心和 100% 饱和盐水装载进岩心夹持器中;
- (2) 在设计的实验条件下用油驱替至束缚水饱和度;
- (3) 在设计的实验条件下用油驱替, 驱替的方法是从低压差向高压差驱替, 每一压力点持续 30 min, 直到测定出启动压力为止。

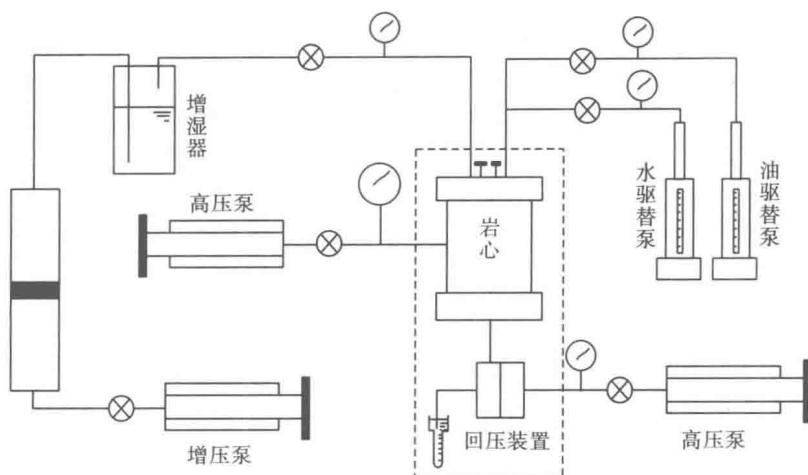


图 1-16 启动压力实验流程

2. 启动压力梯度实验现象

在压力梯度低于某一界限时，流体不能克服流动的阻力，不发生流动，即存在启动压力梯度；在压力梯度大于启动压力梯度后，压力梯度与流量之间的关系不是简单的线性关系，而是复杂的非线性渗流；只有当压力梯度继续增大到某一数值后，压力梯度与流速之间的关系才呈线性关系(骆瑛等，2012)。

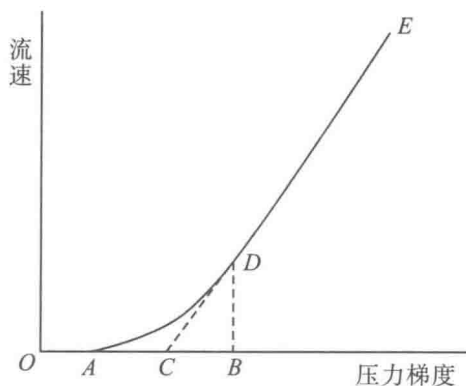


图 1-17 低渗透储层非达西渗流动态曲线

结合孔隙结构分析，从图 1-17 看，不同的压力梯度下流体流动的特征有其规律。图中 A、B、C、D、E 五点的含义为：A 点是最大半径毛管的启动压力梯度，C 点对应的是平均半径毛管启动压力梯度。B 点是最小半径毛管启动压力梯度。A、C 两点对应的压力梯度分别被称为真实启动压力梯度和拟启动压力梯度。D 点对应的是渗流由非线性渗流到拟线性渗流的过渡点，直线 DE 对应的渗流过程称为拟线性渗流，曲线 AD 对应的渗流过程称为非线性渗流(齐银，2006)。

四、应力敏感实验

1. 应力敏感实验仪器介绍

储层岩石应力敏感性实验仪器包括气瓶、减压阀、围压泵、干燥过滤器、温度计、微调压稳压阀、进口标准压力表、岩心夹持器、出口控制阀、气体流量计、计时秒表、4块大牛地气田致密砂岩岩心样品。实验流程见图 1-18 所示，进口压力为恒压，出口压力值为大气压，确保进出口压差为恒定值。实验是在室温低压下进行，逐渐加高围压，从而测试不同围压下岩心的渗透率的变化，测试其应力的敏感性(王洋，2011)。

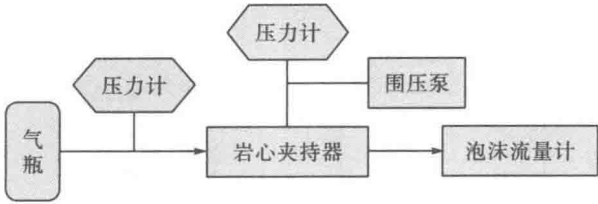


图 1-18 致密砂岩应力敏感实验仪器示意图

2. 应力敏感实验流程及评价方法

参照中国石油行业发布的储层敏感性流动实验评价方法(SY/T 5358—2002)对大牛地气田 4 块岩心样品做应力敏感实验，具体实验流程如下。

- (1)钻取直径为 2.5 cm，长度为 4~5 cm 的圆柱体致密砂岩样，测其围压在 6 MPa 下的渗透率、孔隙度。
- (2)把致密砂岩样放入岩心夹持器，保持进口压力不变，测其围压为：6 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa、60 MPa 下的渗透率。测试过程中，每 20 分钟测 3 次，取平均值，直到渗透率稳定为止，再测试下一个围压下的渗透率。
- (3)保持进口压力不变，缓慢减小围压，分别测出在围压为 60 MPa、50 MPa、40 MPa、30 MPa、20 MPa、15 MPa、10 MPa、6 MPa 时的渗透率。
- (4)结束实验，关闭仪器。
- (5)利用公式(1-2)，计算应力敏感系数 S_s ，评价应力敏感程度，具体评价标准见表 1-1。

$$S_s = \left[1 - \left(\frac{K}{K^*} \right)^{1/3} \right] / \lg \frac{\sigma'}{\sigma^*} \tag{1-2}$$

式中， σ^* ——参考有效应力值，即初始值，对应渗透率值记为 K^* ； σ' ——各个有效应力，对应渗透率值记为 K ； S_s ——斜率，称应力敏感系数。

表 1-1 应力敏感程度评价标准

S_s	<0.30	0.30≤ S_s ≤0.70	0.70≤ S_s ≤1.0	>1.0
敏感程度	弱	中等	强	极强