

低渗透油藏渗流机理及应用

● 何勇明 编著



地质出版社

低渗透油藏渗流机理及应用

何勇明 编著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书对低渗透油藏的渗流机理进行了详细的论述,包括低渗透油藏发展趋势及划分标准、多孔介质特征、单相和油水两相渗流、水锁机理及解水锁方法、产能预测模型、分段压裂技术等。在理论研究的基础上,用实例进行了剖析与运用。

本书可作为高等院校相关专业研究生,特别是专业硕士的参考书,也可供油田开发方面的科研技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏渗流机理及应用 / 何勇明编著. —北京:
地质出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-116-08977-8

I. ①低… II. ①何… III. ①低渗透油层—油气藏渗
流力学—研究 IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 203995 号

责任编辑: 孙亚芸

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324569 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 207 千字

版 次: 2014 年 9 月北京第 1 版

印 次: 2014 年 9 月北京第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08977-8

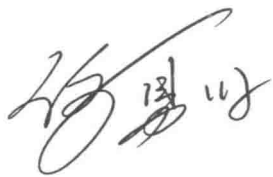
(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

低渗透油藏开发是全球的大趋势。在我国油气剩余资源储量及油气产量中,低渗透油气所占比例将持续增大,我国未来油气产量稳产增产将更多地依靠低渗透油气藏开发。随着勘探程度的提高和油气资源需求的不断增长,无论是从剩余油气资源,还是从目前的开发趋势分析,低渗透油气藏开发都将是油气开发建设的主战场。近年来出现了非常规油气开发,这给低渗透特别是特低渗透油藏开发提供了新的机遇,将带动特低渗透油藏微观渗流机理的研究。我国在研究和开发低渗透油气藏方面获得了大量成果,本书只涉及其中很小一部分。

本书在借鉴前人研究成果的基础上,介绍了一些新的成果及认识。第1章简要介绍了低渗透油气藏的开发趋势,以及低渗透油气藏划分的老标准;第2章主要介绍了低渗透油藏的多孔介质特征;第3章介绍了恒速压汞及核磁共振在储层划分中的应用,并提出了综合划分储层的主要参数及辅助参数,以完善低渗透储层划分标准,还特别提到致密砂岩油和低渗透油藏界限认识的问题,以供大家讨论;第4章介绍了低渗透储层单相渗流特征,部分内容参考了黄延章研究员的研究成果,在此表示感谢;第5章重点介绍了低渗透储层油水两相流特征,特别是分段启动压力梯度、压力敏感、驱油效率及拟油藏条件下的相渗关系;第6章重点介绍了水锁现象的识别、水锁机理及解水锁方法,重点提到在开发过程中的储层保护问题,特别是注水水质对低渗透开发有重要的影响;第7章主要介绍了考虑启动压力梯度的产能预测模型,包括直井和水平井模型,水平井产能预测模型很多,方法各不一样;第8章、第9章简要介绍了低渗透油藏水平井分段压裂技术及分段压裂后的渗流机理。

由于作者水平有限,书中难免会出现一些不足,诚请读者同仁批评指正。



2014.6

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 低渗透油藏发展趋势	(1)
1.2 低渗透油藏概念及划分	(2)
1.3 低渗透油藏开发的主要难题	(3)
第 2 章 低渗透油层多孔介质的主要特征	(4)
2.1 储容性	(4)
2.2 渗透性	(5)
2.3 比表面	(6)
2.4 低渗透储层孔隙结构特征	(6)
2.4.1 孔隙大小的划分	(6)
2.4.2 孔隙喉道结构特征	(6)
2.5 多孔介质的流变性	(7)
2.6 渗透率与孔隙介质平均孔道半径的关系	(8)
2.7 孔隙介质与流体之间的相互作用	(9)
2.7.1 水对孔隙结构的影响	(9)
2.7.2 界面张力的影响	(10)
2.7.3 边界层的影响	(10)
2.7.4 其他因素对渗流的影响	(11)
第 3 章 低渗透储层划分及评价	(12)
3.1 主力层及非主力层的认识	(12)
3.2 恒速压汞技术研究孔隙结构	(13)
3.2.1 恒速压汞的比较优势	(13)
3.2.2 恒速压汞实验原理	(13)
3.2.3 恒速压汞实验测试	(14)
3.2.4 储层划分及评价	(18)
3.3 核磁共振分析可动流体饱和度	(19)
3.3.1 核磁共振原理简介	(19)
3.3.2 储层划分及评价	(20)
3.4 储层综合划分及评价	(21)

第4章 低渗透储层流体单相渗流特征	(24)
4.1 渗流的非线性规律	(24)
4.2 渗流时的启动压力梯度	(25)
4.3 渗流过程的物理意义和基本特征	(26)
4.3.1 渗流过程的物理意义	(26)
4.3.2 渗流过程的基本特征	(29)
4.4 单相流体渗流规律	(29)
4.5 低渗低速渗流的流态与准数	(30)
4.5.1 低渗低速渗流的流态	(30)
4.5.2 低渗低速渗流的准数	(31)
4.5.3 单相渗流数学方程	(33)
第5章 低渗透储层流体油水两相渗流特征	(37)
5.1 油水两相渗流的微观渗流机理	(37)
5.1.1 亲水地层中水驱油微观机理	(37)
5.1.2 亲油地层中水驱油微观机理	(38)
5.1.3 中性地层中水驱油微观机理	(39)
5.2 残余油的形成和分布	(39)
5.2.1 在亲水多孔介质中残余油的形成	(39)
5.2.2 亲油多孔介质中残余油的形成	(39)
5.2.3 中性多孔介质中残余油的形成	(40)
5.3 分段启动压力梯度	(40)
5.3.1 启动压力梯度测试结果对油田开发的意义	(41)
5.3.2 启动压力梯度测试分析	(41)
5.4 分段启动压力梯度对驱动压差的影响	(43)
5.4.1 不同计算方法对驱动压差计算的影响	(43)
5.4.2 井距对驱动压差的影响	(44)
5.5 流态判别的划分	(44)
5.6 低渗透储层的应力敏感性	(46)
5.6.1 储层岩石应力敏感性研究现状	(46)
5.6.2 孔渗随压力变化的关系	(49)
5.7 拟油藏条件下油水的相对渗透率	(52)
5.8 驱替压力梯度与驱油效率的关系	(53)
5.9 运用核磁共振技术研究驱油效率	(55)
5.9.1 低渗储层岩心可动流体饱和度与驱油效率关系	(55)
5.9.2 不同孔隙(大、中、小)中的驱油机理	(56)
5.9.3 不同渗透率岩心大孔隙中的驱油机理	(58)
5.9.4 水驱油过程中饱和油孔隙动用程度实验	(59)

第 6 章 低渗透储层伤害机理	(62)
6.1 水锁伤害机理	(62)
6.1.1 毛细管效应造成的水锁伤害	(62)
6.1.2 贾敏效应造成的水锁伤害	(63)
6.1.3 其他因素	(64)
6.2 解除水锁的方法	(64)
6.2.1 延长关井时间	(64)
6.2.2 增大生产压差	(64)
6.2.3 注热	(65)
6.2.4 注气	(65)
6.2.5 酸化压裂	(65)
6.2.6 使用表面活性剂	(65)
6.3 水锁的基本特征及判断	(65)
6.4 水锁伤害程度及油井解水锁效果评价	(66)
6.5 储层水锁伤害后水井降压增注效果评价	(67)
6.6 注入表面活性剂前后相对渗透率曲线	(68)
6.7 外来固相颗粒对储层的损害	(69)
6.7.1 滤饼形成速度和质的影响	(70)
6.7.2 固相颗粒的粒径与储层孔喉的大小	(70)
6.7.3 压差的影响	(70)
6.7.4 固相颗粒的含量	(70)
6.7.5 剪切速率	(70)
6.7.6 微粒运移堵塞	(70)
6.7.7 水化膨胀	(71)
6.8 结垢伤害	(72)
6.8.1 无机垢	(72)
6.8.2 有机垢	(73)
6.8.3 储层敏感性损害	(74)
6.8.4 流-固耦合影响	(74)
6.9 酸化造成的伤害	(74)
6.9.1 酸化原理	(74)
6.9.2 酸液与地层的不配伍	(75)
6.9.3 酸液与油层流体的不配伍	(75)
6.10 压裂造成的伤害	(76)
6.11 低渗透储层保护技术研究	(76)
6.11.1 钻井过程中的储层保护技术	(76)
6.11.2 完井过程中的储层保护技术	(77)

6.11.3	试油作业过程中的储层保护技术	(79)
6.11.4	开发过程中的储层保护技术	(79)
第7章	低渗透油藏产能预测模型	(85)
7.1	考虑了启动压力梯度的直井产能预测模型	(85)
7.2	考虑了污染及压裂增产的直井产能预测模型(1)	(86)
7.2.1	压裂井渗流力学模型的建立	(87)
7.2.2	压裂井产能预测模型	(87)
7.2.3	压裂增产规律分析	(89)
7.3	考虑了污染及压裂增产的直井产能预测模型(2)	(91)
7.3.1	低渗透储层受污染前后的产能模型	(91)
7.3.2	渗透率与启动压力梯度的关系	(93)
7.3.3	污染井压裂前后的产能模型	(93)
7.4	考虑了启动压力梯度的水平井产能预测模型	(95)
7.4.1	各向同性油藏的水平井产能预测模型	(95)
7.4.2	各向异性油藏的水平井产能预测模型	(98)
第8章	低渗透油藏开发技术政策	(100)
8.1	合理的采油速度	(100)
8.1.1	统计公式法	(100)
8.1.2	线性回归经验公式法	(101)
8.1.3	实际开发资料估算法	(102)
8.1.4	数值模拟法	(102)
8.1.5	特殊油藏的合理采液速度法	(102)
8.1.6	油井流入曲线法	(102)
8.1.7	储采比法	(103)
8.1.8	稳产期剩余可采储量采油速率	(104)
8.2	合理注水压力	(104)
8.2.1	破裂压力计算	(105)
8.2.2	注水井最大井口注水压力	(105)
8.3	注水强度	(107)
8.3.1	数值模拟法	(107)
8.3.2	采油速度法	(108)
8.3.3	毛细管力曲线法	(109)
8.3.4	吸水能力分析法	(109)
8.3.5	注采井距法	(110)
8.3.6	经验公式法	(111)
8.4	合理井网井距	(111)
8.4.1	合理井网	(111)

8.4.2 合理井距 (112)

第 9 章 低渗透油藏水平井分段压裂 (116)

9.1 水平井压裂工艺技术的发展现状 (116)

9.1.1 水平井多裂缝同时压裂技术 (116)

9.1.2 水平井分段压裂技术 (116)

9.1.3 水力喷射压裂技术 (117)

9.1.4 其他压裂技术 (118)

9.2 分段压裂水平井渗流特征 (118)

9.2.1 常规水平井和分段压裂水平井等压线 (118)

9.2.2 多段压裂水井渗流 (119)

9.3 分段压裂水平井优化参数 (121)

参考文献 (123)

附录 平均势函数的推导 (125)

第1章 绪 论

1.1 低渗透油藏发展趋势

低渗透油藏开发是全球的大趋势，全世界都在开发低渗透油藏。在我国油气产量中，低渗透油气所占比例将持续增大，我国未来油气产量稳产增产将更多地依靠低渗透油气的开发。随着勘探程度的提高和油气资源需求的不断增长，无论是从剩余油气资源，还是从开发趋势分析，低渗透油藏开发都将是我国油气开发建设的主战场。

截至2010年，我国剩余石油资源量为 $799 \times 10^8 \text{t}$ ，其中低渗透油藏为 $431 \times 10^8 \text{t}$ ，占剩余石油资源（含重油）总量的60%；全国剩余天然气资源为 $49.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中低渗透天然气资源为 $24.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占剩余天然气资源总量的51%。如图1.1、图1.2所示。

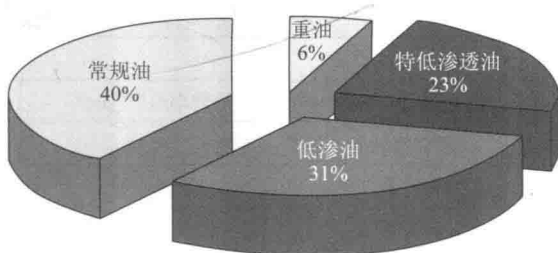


图 1.1 2010 年我国剩余石油资源品位分布

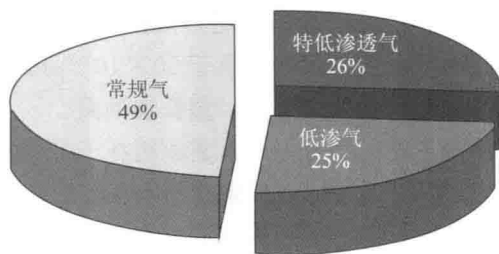


图 1.2 2010 年我国剩余天然气资源品位分布

图 1.3 统计了2006~2011年我国低（特）渗透油藏产量占当年全国原油总产量的比例。从图中可以看出：该比例从2006年的34%上升到2011年的38%，有逐年升高的趋势。

目前，全球油气勘探开发的主流趋势是低渗透油气开发、老油田提高采收率、天然气勘探开发、深海油气勘探和新能源（包括非常规油气资源——煤层气、油页岩、油砂）开发，且前三者已经成为国际石油公司选择的主要目标。可以肯定地说，低渗透油藏开发已是中国油气开发建设的主战场，中国石油低渗透开发的前景十分看好，但是，难度也将越

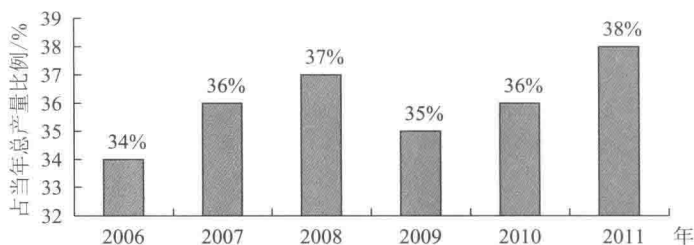


图 1.3 我国低渗油产量占当年全国原油总产量的比例

来越大。

1.2 低渗透油藏概念及划分

国际石油界用“毫达西”(mD)^①作为反映油气渗透率的基本单位,“毫达西”数值越低,油气的渗透率就越低。我国通常把渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏称为低渗透油藏,把渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的气藏称为低渗透气藏。如表 1.1 所示,此为我国低渗透油气藏的传统划分标准。

表 1.1 我国低渗透油气藏传统划分标准

石油		天然气	
渗透率/ $10^3 \mu\text{m}^2$	类别	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	类别
50~10	一般低渗透	10~1	一般低渗透
10~1	特低渗透	1~0.1	特低渗透
<1	超低渗透	<0.1	超低渗透

不同的国家在不同的时期对低渗透油藏的划分标准不尽相同。比如,在 1993 年,俄罗斯把渗透率为 $(50 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏定为低渗透油藏,美国把渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏定为低渗透油藏,而中国则把小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的渗透率为低渗透油藏,在此基础上又细分出了低渗油藏、特低渗油藏、超低渗油藏。

不同国家之间之所以出现不同的划分标准,其原因在于低渗透油藏的划分与该国的国民经济发展水平、低渗透油藏的开发技术以及资源量有关。

我国经济经过几十年的发展,各行业对原油的需求逐渐增加,而且拥有了对一般低渗透 ($(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 油藏开发的比较成熟的技术,因此,对低渗透油气藏重新进行了划分,其标准见表 1.2。

新标准划分的意义是将一大批过去认为是低品质的储量转化为了可动用储量。如长庆油田,2003 年,以渗透率 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为下限,计算出鄂尔多斯盆地石油远景资源量为 $85.88 \times 10^8 \text{t}$;如果以渗透率 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为下限,则石油远景资源量可能是 $120 \times 10^8 \text{t}$ 。技术进步、油价上涨都可以使低渗透油气藏开发的储层下限下移。

① $1\text{mD}=1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表 1.2 我国低渗透油气藏的划分新标准

石油		天然气	
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	类别	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	类别
10~1	一般低渗透	5~1	一般低渗透
1~0.5	特低渗透	1~0.1	特低渗透
<0.5	超低渗透	<0.1	超低渗透

1.3 低渗透油藏开发的主要难题

- 1) 低渗透油藏的渗透表现为“非达西流”，影响采收率的提高。
 - 2) 低压储层投产后，采液、采油指数很快下降，一般常规注水很难恢复（超前注水可以解决这个问题）。
 - 3) “低渗、低压、低丰度”造就了“多井低产”，增加了成本投资和运行成本。
 - 4) 对于低渗透水平井长水平段分段压裂技术、渗流机理、油藏—裂缝—井筒耦合模型，目前还缺少可行的实验手段，三耦合模型是否存在解，现在仍在探索阶段。
- 上述四大世界级的难题，经过石油工程技术人员近 40 多年的不懈努力，前两道已经从理论和实践上成功得到了破解，后两道正在努力破解之中。

第2章 低渗透油层多孔介质的主要特征

流体通过多孔介质（由毛细管或微毛细管组成）的流动叫作渗流。专门研究渗流的运动形态和运动规律的科学叫作渗流力学。

渗流力学是流体力学的一个分支，是流体力学和多孔介质理论、物理化学、固体力学等相交叉形成的边缘学科。

渗流现象普遍存在于自然界。化工、冶金等各种工程领域内的渗流称作工程渗流；人和动植物体内的渗流称作生物渗流；石油、天然气、地下水等流体在地下的流动称作地下渗流。本书研究地下渗流的某一个方向。

由于多孔介质是由微米级大小的孔隙和喉道组成的，具有复杂的孔道结构和连通形式、多样的表面性质和很大的比表面，有时还具有显著的弹塑性，因此，表现出渗流阻力大、表面力显著的特点。同时，流体的物理化学性质复杂，渗流过程一般还伴有复杂的物理化学现象发生。这些复杂的过程和现象促使渗流力学逐渐独立于流体力学而成为一门专门的学科。

既然渗流力学是与多孔介质密切相关的，那么，下面就介绍多孔介质的性质。油气的流动是在储集层内进行的，储集层是以岩石颗粒为骨架并含有大量微毛细管孔隙空间的介质，这种介质叫作多孔介质。多孔介质是渗流的基础和前提。

2.1 储容性

多孔介质是以固相介质为骨架，其中包含一部分空的孔隙空间，这部分空的孔隙空间被单相或多相物质所填充，但至少有一相不是固体，而是流体，无论是气还是其他物质。储集和容纳流体是多孔介质的一个重要特征。显然，多孔介质储容性的好坏与孔隙空间的大小有关，因此，引入了孔隙度的概念。将单位体积岩石中所有孔隙的总体积定义为绝对孔隙度，用公式表示为：

$$\varphi_a = \frac{V_r}{V} \quad (2.1)$$

式中： V_r ——孔隙体积， cm^3 ；

V ——岩石体积， cm^3 ；

φ_a ——绝对孔隙度。

在估计油藏绝对储量时， φ_a 的大小具有重要的意义。

实际上，在岩石孔隙中，有一部分死孔隙，它们是不能够让流体通过的微毛细孔隙或是被微毛孔包围的孔隙。这部分孔隙对渗流来说是无效孔隙，因此，引出了有效孔隙度的

概念。将岩石的有效孔隙体积（除去无效体积部分的孔隙）和岩石体积之比定义为有效孔隙度，其表达式为：

$$\varphi_e = \frac{V_e}{V} \quad (2.2)$$

式中： V_e ——有效孔隙体积， cm^3 ；

V ——岩石体积， cm^3 ；

φ_e ——有效孔隙度。

2.2 渗透性

多孔介质中的孔隙空间至少有一部分是相互连通的，流体能在这部分连通的孔隙中流动。多孔介质具有让流体通过的这种性质叫作渗透性。互相连通的孔隙体积叫“有效孔隙体积”，但值得注意的是，即使互相连通的孔隙体积，有的也是无效的。例如：带有“死端”的孔隙（或称“盲孔”），也就是孔隙与通道之间仅有一个很窄的出口。这种孔隙当中几乎没有流动发生。岩石的渗透性用渗透率 K 来表示：

$$K = \frac{Q\mu\Delta L}{A\Delta p \times 10} \quad (2.3)$$

式中： Q ——流量， cm^3/s ；

μ ——流体黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

ΔL ——岩石长度， cm ；

A ——岩石横切面积， cm^2 ；

Δp ——岩心两端压差， MPa ；

K ——渗透率， μm^2 。

由此可以看出，多孔介质的渗透率在物理学上的意义是：当液体黏度为 1cP ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$) 时，在压力降为 0.1MPa 的情况下，渗流过断水面为 1cm^2 、长度为 1cm 的岩样，其流量为 $1\text{cm}^3/\text{s}$ 。以此多孔介质的渗透率作为渗透率的单位，其值为 $1\mu\text{m}^2$ 。

应当指出，渗透率的大小只决定于岩石的性质，即决定于岩石的孔隙结构和孔隙大小，而与所通过的液体的性质无关。

岩石的渗透率分为 3 种：即绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率。

绝对渗透率：岩石的孔隙中流体为一相时，岩石允许流体通过的能力叫绝对渗透率。它是只与岩石本身性质有关的一种属性。

有效渗透率：当岩石中流体存在几相时，岩石对每种流体通过的能力叫作该相的有效渗透率（如果各相同时流动，习惯上叫作相渗透率）。因此，有效渗透率除了表征岩石性质外，还表征流体的物理性质及其在孔隙中的运动特性。岩石对某种流体的有效渗透率是随这种流体在岩石内的饱和状况而变化的，显然岩石孔隙内其他流体的存在都会使岩石对这种流体的渗流能力降低。由此可见，有效渗透率总是小于绝对渗透率。

相对渗透率：岩石的有效渗透率和绝对渗透率的比值叫作岩石的相对渗透率。它的变化范围从 0 到 1。

2.3 比表面

在多孔介质中任取一个单元体积都包含着连续的固相，由于多孔介质中又含有大量的孔隙空间，所以固相就具有很大数量的表面积。单位体积的岩样内所有颗粒的总表面积称为岩石的比表面。多孔介质一个最本质的特性就是固体颗粒的比表面很大，比如， 1m^3 中粒砂岩中孔道的表面积在 20000m^2 以上，这就使得渗流摩擦阻力很大。从很多方面来看，这个性质决定了多孔介质中流体的动态。

2.4 低渗透储层孔隙结构特征

油层所处位置属于多孔介质，是原油储集和流动的场所，由岩石的颗粒、胶结物作为固体骨架及大量形态复杂的孔隙网格空间组成。油水就在那些细小的孔隙网格中流动。对于特低渗透油层，多孔介质对其的影响具有一定的特殊性。

2.4.1 孔隙大小的划分

截至目前，孔隙大小的划分，尚无统一的标准。表 2.1 总结了前人的划分方案。

表 2.1 孔隙按直径大小划分方案 单位： μm

分类	长庆油田	立方球体排列的孔隙	邸世祥	李道品	罗蛰谭	丘陵油田
大孔隙	>20	粗砂： >207 中砂： $207\sim104$ 细砂： $104\sim41.4$	>50	>40	粗孔： >100	≥ 50
中孔隙	$20\sim6$	粗粉砂： $41.4\sim20.71$	$50\sim10$	$40\sim20$	细孔： $100\sim10$	<50
小孔隙		细粉砂： $20.71\sim4.14$	$10\sim5$	$20\sim4$		
微孔隙	<6		$5\sim1$	$4\sim0.05$	<10	
难流动孔隙 (吸附孔)				<0.05		

2.4.2 孔隙喉道结构特征

众所周知，研究流体在多孔介质内的流动时，不能不考虑多孔介质的特征。在多孔介质的特征方面，首要的是孔隙结构。一般把油层间孔隙结构分成 3 种类型，即大孔粗喉型、大孔细喉型以及小孔细喉型。高渗透油层的孔隙类型一般属于大孔粗喉型，大孔隙的体积占总体积的比例很大，在压汞曲线（毛细管压力曲线）上表现为排驱压力较低，曲线上有一个范围较大的“平台”，毛细管压力曲线偏向左下方。中渗透油层的孔隙类型一般属于中孔细喉型，毛细管压力曲线的“平台”范围很小，排驱压力较高，毛细管压力曲线离左下方较远。低渗透或特低渗透的油层孔隙类型属于小孔细喉型，孔隙很小，喉道很细，渗透率的贡献值主要由占孔隙体积比例小、较粗的孔道提供，毛细管压力曲线偏左上

方。对比这 3 种类型的孔隙结构, 可以看到, 低渗透或特低渗透油层的孔隙系统与中高渗透层显著不同, 它孔隙很小, 喉道很细, 孔喉比也增大。孔隙结构上的差异会对其中多项流体的分布及渗流规律产生影响, 特别是对低渗或特低渗透油层, 其影响是很明显的。这个特征反映在流体饱和度上, 其表现主要是油层一般原始含水饱和度高、含油饱和度低、压汞实验中退汞效率低, 这表示原油储量中难开采的部分占有很大比例, 并且经常遇到的是早期无退汞或退汞很少。

从储层的粒度组成来看, 特低渗透砂岩的粒度组成也与中高渗透层不同, 它的主要成分是极微细的粉砂岩, 且有一定的泥质含量, 因此, 它的孔隙结构特征主要表现为孔隙半径小、孔隙分布不均匀, 经常出现双峰态分布、微孔隙的比例增大、比表面增大、孔喉比增大等特点。当流体经过这种具有特低渗透孔隙结构特点的油层时, 必然会产生更多的物理化学现象, 这将直接影响低渗油层中的渗流特征和规律。

2.5 多孔介质的流变性

有效应力变化时, 多孔介质随之变形的特性称为多孔介质的流变性。

油田在开发过程中, $p_{\text{地层}}$ 下降, 特别是特低渗透油藏表现明显。特扎基 (Terzaghi, 1951) 指出: 多孔介质受到双重的应力, 包括中性平衡应力和有效应力。

多孔介质在流体中所受的应力称为中性平衡应力。对流体来说, 它是一种内应力。

在饱和流体的多孔介质中占优势的总应力 (覆盖层压力, 是一种垂向应力) 与中性平衡应力 (流体压力) 的差值称为有效应力, 即 $p_{\text{有效}} = p_{\text{总}} - p_{\text{流体}}$ 。多孔介质中有效应力上升迫使岩石格架变形以致破坏, 这个不可逆过程使多孔介质的流变学特性发生变化。

当其中的有效应力变化时, 不发生变形的多孔介质称为不变形介质。当其中的有效应力变化时, 发生变形的多孔介质称为变形介质。

油气层在渗流过程中产生弹性力。岩石受到上面覆盖的岩柱压力、油层流体压力的作用, 呈压缩状态, 体积、形状发生变化。

在外力作用下, 多孔介质的体积、形状都会变化, 当减去压力后它又能恢复到原来的体积和形状, 多孔介质的这种性质称为多孔介质的压缩性, 常用 $C_{\text{岩}}$ 表示岩石的压缩系数。

岩石孔隙结构 (粒间孔隙、裂缝) 不同, 孔隙形状、承受力的作用不同, 岩石的压缩系数不同。

当一个物体 (或物质的聚集体) 在一个适当的力系作用下, 其形状和尺寸改变了, 我们就说这个物体发生了形变, 如果物体的形变程度随时间而持续发展, 我们就说物体发生了流动, 从某种意义上来说流动是随时间持续发展的一种形变。因而, 全面地阐明连续介质运动应当包括两个方面: 一是连续介质的运动方程; 二是材料的流变状态方程, 或称为本构方程, 也就是应力和变形率之间的关系, 非牛顿流体力学和牛顿流体力学的差别就在于本构方程。

所谓的牛顿流体是指流体流动时的剪切应力 τ 与剪切速率 γ 之间呈线性关系, 即:

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (2.4)$$

式中： μ 为流体黏度。也就是说牛顿流体流动时，其应力和变形率（剪切速率）之间的关系为线性本构关系，如图 2.1 所示， τ 和 γ 为通过原点的直线。

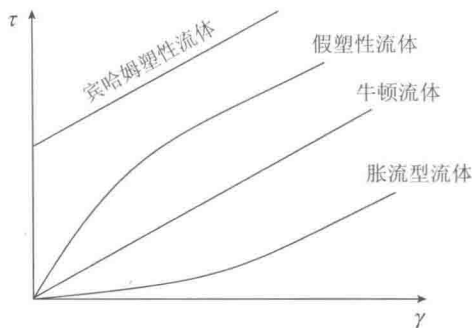


图 2.1 流体的流变曲线

非牛顿流体的性质比较复杂，在石油开发中，主要涉及宾哈姆（Bingham）塑性流体，所以只从这个方面进行简单介绍。

宾哈姆塑性流体，又称为黏塑性流体，这是非牛顿流体中较简单的一种，如钻井液和某些高黏度原油，其流动特点是：当流体开始受到外力作用时并不流动，其性质像固体；当剪切应力逐渐增加，达到某个临界值时，它才开始流动，这个临界剪切应力称为屈服应力。如图 2.1 所示，流动以后，其流态与牛顿流体相同。其本构方程为：

$$\tau = \tau_B + \mu_B \gamma \tag{2.5}$$

- 式中： τ_B ——屈服应力；
 τ ——剪切应力；
 γ ——剪切速率；
 μ_B ——宾哈姆黏度。

因此，在开发这类油藏时必须注意原油弹塑性的影响。

2.6 渗透率与孔隙介质平均孔道半径的关系

油层的渗透率取决于岩石孔隙孔道的大小，明确它们之间的关系有很大的实际意义。地层中油水的物理力学性质、黏滞力、毛细管力、剪切应力（含剪切应力和极限剪切应力）、运动阻力等，都与岩石的孔隙孔道大小有关，也就是与渗透率有关。

虽然岩心的渗透率与岩心的孔隙结构（孔径分布）之间并不存在唯一性，即渗透率相同的岩心可能具有不同的孔隙孔径分布曲线，但是如果在渗透率与其平均孔道半径之间找到某种关系，那是非常有用的。渗透率本身就是岩心中各种不同半径孔道的孔隙系统允许流体通过的一种平均参数。所以，渗透率与平均孔道半径之间的关系是一种数理上性质对等的关系。

从表 2.2 可以看出，长庆油田中高渗透层的主流喉道半径为 $11.7\mu\text{m}$ ，特低渗透层为 $1.5\mu\text{m}$ ，约是中高渗透层的十分之一。而中高渗透层的渗透率为 $181 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，特低渗透层的渗透率只有 $4.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，仅为高渗透层的 3%。