

库本

高等学校教材

第

石油渗流力学基础

徐献中 编著

北京)

中国地质大学出版社

072975

高等学校教材



石油渗流力学基础

徐献中编著



中国地质大学出版社



内 容 提 要

本书在达西渗流定律、状态定律和能量守恒定律基础上,结合多年来的石油勘探开发实践,对油藏工程中常用的石油渗流力学作出详细阐述,以图帮助石油地质专业的师生及有关生产科研人员深入理解和应用这门新兴学科,从而有助于提高石油产量和石油采收率。

本书概念交代清晰,数理推导详尽,对某些在石油地质界长期被人含混的问题作了仔细分析,因而本书既适合于初学者学习,也适于有关科研及教学工作者参考。

D/P33/14



石油渗流力学基础

徐献中 编著

责任编辑:龙祥符 责任校对:龙祥符

☆

出版发行:中国地质大学出版社
(武汉市 430074)

印 刷:中南三〇九印刷厂印刷

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 355 千字
1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷 印数 1—1000 册
ISBN 7-5625-0733-3/TE·2 定价: 6.40 元

前言

石油在油藏的多孔介质中流动称为渗流。研究石油渗流规律的学科是石油渗流力学。随着石油工业的发展,石油渗流力学以其独特的理论和对生产实践的实用意义,从地下水动力学中脱颖而出,成为一门崭新的学科。石油渗流力学研究的基本问题是:在一定的石油物理化学性质及其所在油藏地质物理参数条件下,弄清楚渗流驱动力和阻力的变化,以及渗流形式的制约关系。石油渗流力学所依据的基本理论是达西渗流定律、状态定律和质量守恒定律。不过多地注意于单个孔隙的特性而着眼于整体,从宏观进行分析是石油渗流力学研究的主要特征。

石油的形成、运移和聚集是一种漫长地质历史时期的缓慢的地质与物理化学过程,寻找与勘探石油矿藏耗费大,风险也大,而石油的开发开采是一种采出程度并不很高的生产过程,因而增强寻找与勘探油藏的效果,提高石油产量和最大采出程度,是石油地质勘探与开发开采工作者当今所负的光荣而又艰巨的任务。

石油是一种流动性矿床。从其形成、运移、聚集和开发以及较高采出程度的开采,无不流动密切相关。石油渗流力学是一门既具有较深的理论基础又是极有效的实用方法的课程。石油地质勘探专业的学生应具备相当程度的渗流力学知识是必要的。如果说当前从事石油地质勘探的专业人员还缺乏什么专业科学知识的活,缺乏石油渗流力学知识就是一个很普遍的问题。随着勘探工作的深入,石油地质人员很少具备甚至缺乏石油渗流力学知识的矛盾将日益明显,他们也将难以胜任工作。

尽管石油渗流力学在发展石油地质、开发开采理论和实践中作出了贡献,但目前的石油渗流力学理论和技术还不能很好适应石油工业发展对它所提出的要求,尤其在开发开采前的石油生成、运移和聚集方面很多问题,还没有从石油渗流力学方面解决,或者说解决得并不很好;但可以相信,随着实践的深化,这个不适应性会有所改善,石油渗流力学也将得到进一步的发展。

天然气在油气藏或油藏中的渗流明显不同于石油的渗流,天然气渗流力学基本理论和基本知识的学习同样是石油地质勘探专业学生所必需的,但很遗憾由于学时所限及其它原因本教材未能涉及,这是有待解决的。

本书在校内铅印(1986)使用中,陈元千教授对教材提出了极宝贵的意见;这次正式出版,定稿后,齐与峰教授给予了极大帮助;龙祥符教授、褚松和副编审热忱支持,前者亲任责编,加工、设计后,又勉力再任责校,谨在此向我的老师和同学表示衷心的感谢。

编写中参阅和引用了一些国内外同行的著作,在此对他们的辛勤劳动表示谢意。

作为教材尚需在使用中得到检验,在此真诚地希望使用的同志们提出宝贵的意见。

编著者

1992. 3. 武汉

目 录

第一章 油藏中石油渗流基本概念和基本规律	1
1.1 驱油能量和油藏压力	1
1.1.1 驱油能量和驱油动力	1
1.1.2 静水柱压力	1
1.1.3 油藏压力和油井井底压力	6
1.1.4 异常油藏压力	7
1.1.5 折算压力	12
1.1.6 Hubbert 流体势方程	20
1.2 储油层特征和液体运动速度	24
1.2.1 储油层特征	24
1.2.2 液体运动速度	27
1.3 渗流基本规律	29
1.3.1 均质性与非均质性和各向同性与各向异性	29
1.3.2 达西实验定律——均质液体渗流方程	29
1.3.3 渗透率概念的引入	33
1.3.4 达西公式物理含义的理解	38
1.3.5 达西公式的扩广及其局限性	47
1.4 渗流的基本类型	57
1.4.1 直线渗流	57
1.4.2 平面径向渗流	58
1.4.3 球形径向渗流	59
第二章 水压驱动方式下均质不可压缩液体稳定渗流规律	61
2.1 水压驱动方式下均质不可压缩液体向井的直线渗流	61
2.1.1 整个油层的厚度和渗透率均一不变	61
2.1.2 渗透率变化的非均一油层	64
2.1.3 渗透率变化对流量和压力分布的影响	67
2.2 水压驱动方式下均质不可压缩液体向井的平面径向渗流	73
2.2.1 整个油层的厚度和渗透率均一不变	73
2.2.2 渗透率变化的非均一油层	83
2.2.3 平面径向渗流量和压力公式分析	89
2.3 水压驱动方式下均质不可压缩液体向井的球形流	106
2.3.1 球形流	106
2.3.2 球形和平面径向流组合	107
第三章 多井同时工作时均质不可压缩液体的稳定渗流	108
3.1 多井同时工作时的物理现象	108
3.1.1 多井同时工作时的特有现象——井间干扰	108
3.1.2 井间干扰试验——压降叠加原理的引出	108
3.1.3 井间压力分布曲线	111

3.2 井间干扰压力基本公式	112
3.2.1 压力基本公式	112
3.2.2 生产井间干扰现象的数学说明	114
3.2.3 注入井和生产井间相互影响的数学说明	119
3.3 无限大油藏中两口井同时工作	120
3.3.1 一口注入井和一口生产井同时工作	120
3.3.2 两口生产井同时工作	134
3.4 等值渗流阻力法	142
3.4.1 等值渗流阻力基本含义	142
3.4.2 等值渗流阻力法实用步骤	147
第四章 弹性不稳定渗流	152
4.1 弹性液体在弹性多孔介质中向井不稳定渗流的物理过程	152
4.1.1 弹性体与体积压缩系数	152
4.1.2 弹性渗流方式的两种弹性能释放	157
4.1.3 不稳定渗流方式的物理过程和两个压降传导期	159
4.2 弹性渗流基本微分方程	164
4.2.1 单元体内液体质量变化	165
4.2.2 液体和岩层弹性状态方程	167
4.2.3 连续液流方程——质量守恒定律	169
4.2.4 数学演算	170
4.3 弹性不稳定径向渗流基本微分方程——极坐标系表达式	179
4.3.1 弹性不稳定径向渗流极坐标形式的基本微分方程——径向扩散方程	179
4.3.2 径向扩散方程物理含义理解——径向扩散方程推导的简易方法	181
4.3.3 均质非弹性液体在非弹性多孔介质中稳定渗流的基本微分方程	184
第五章 弹性不稳定径向渗流基本方程解及其在试井中应用的某些问题	185
5.1 弹性不稳定径向渗流基本方程数值解	185
5.1.1 有限圆形油藏	185
5.1.2 无限大圆形油藏	186
5.1.3 拟稳定状态流动	195
5.1.4 具有井筒储集效应的无限大油藏中的径向流动	196
5.2 关井恢复压力测试	199
5.2.1 关井恢复压力	199
5.2.2 稳定时间方程	200
5.2.3 压力恢复测试基本公式	205
主要参考文献	215

第一章

油藏中石油渗流基本概念和基本规律

1.1 驱油能量和油藏压力

1.1.1 驱油能量和驱油动力

处于相对平衡状态的油藏，具有一定的潜在能量。一旦油藏被开采，这些潜在能量就以势能形式表现为驱使石油向生产井流动的能源。当然，人为地补充油藏能量，也是油藏的一种动力来源。

有利于石油开采的三大类潜在能量是：压能、位能和岩层表面对不同渗流相的差异能（毛管能）。潜在能量表现为6种力：

- 油藏及气顶中气和水的弹性力；
- 与储层连通的含水层中水的弹性力；
- 溶解于油及多少溶解于水中的天然气的分离膨胀力；
- 储层中流体的重力；
- 多孔岩层孔隙对渗流液体的毛管力；
- 多孔岩层本身的弹性力。

在油藏开采过程中，这些力可呈单一形式促使石油向生产井井底流动，但更多的情况是这些力以多种结合方式起作用。在其各种结合方式中，一种力起主要作用，其它力起着辅助作用。随着开发时间的推移，力的作用也会发生变化：某一时期起主要作用的力后来变为起辅助作用；曾经作为辅助的力后来变为主要作用的力。在油藏工程中，按单一的作用力或按结合力中起主要作用的力来定义该油藏的驱油方式，如：水压驱动、气压驱动、溶解气驱动、弹性驱动和重力驱动。

1.1.2 静水柱压力

A. 压力概念

油藏开发中，所谓压力（ P ）是指单位面积（ A ）上的法向作用力（ F ）。其数学表达式为：

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

按牛顿第二定律

$$F = ma$$

因而压力

$$P = ma/A$$

(1-2)

其量纲积为:

$$ML^{-1}T^{-2}$$

地层压力指下部地层承受的上覆地层压力。越往深处, 压力越大。但是, 上覆地层给予油藏的压力绝大部分已由储层的固体颗粒所承载, 所以在储层与外界水域露头连通良好的情况下, 油藏压力等于其所在位置的静水柱压力。

B. 静水柱压力特性

静水柱压力指静止水作用于该水体内某任意点上的压力。静水柱压力有四个明显的特性。

特性 1 静水柱压力的方向与其作用面的内法线方向一致

从静止水体中任意选取一微小单元体(图 1-1), 并想象单元体中静水柱压力 P 以任意方向作用于 AB 面上 M 点。按静力学方法, 将 P 分解成与作用面 AB 平行的切向分力 P_t 和垂直于作用面 AB 的法向分力 P_n 。按题示, 单元体处于静平衡状态, 如果静止水体承受切向分力的拉力, 水体静平衡将被破坏, 单元体不再处于静止状态。由此推论得出, P_t 为零, 而作用力 P 就等于 P_n , 且其作用方向只能是沿着作用面的内法线方向。

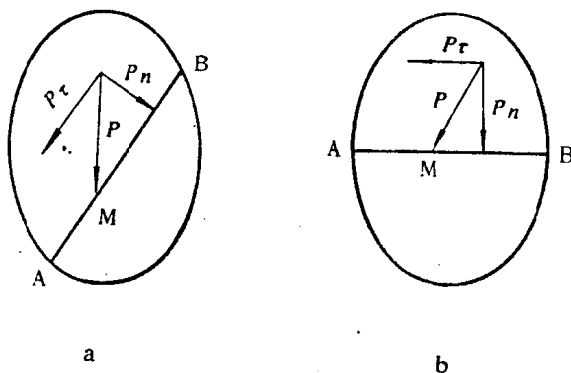


图 1-1 静水柱压力作用方向

a— P 以铅垂方向作用于倾斜面 M 点上,

b— P 以倾斜方向作用于水平面 M 点上

特性 2 静水柱施于油藏中某点上的静水压力在任何方向上都是等强度的

在油藏的静水体中, 任意取一微单元体 $MABC$, 如图 1-2。单元体三个相互垂直的边长分别为 dx 、 dy 和 dz 。作用于单元体四个侧面 $\triangle MAB$ 、 $\triangle MAC$ 、 $\triangle MBC$ 和 $\triangle ABC$ 上的静压力分别为 P_x 、 P_y 、 P_z 和 P 。鉴于单元体 $MABC$ 极微小, 其各侧面上的静压力可以认为是均匀分布的。每个侧面上的总静压力为:

$$\triangle MAB \text{ 面积上 } F_x = P_x dA = P_x \cdot \frac{1}{2} dy dz$$

$$\triangle MAC \text{ 面积上 } F_y = P_y dA = P_y \cdot \frac{1}{2} dz dx \quad (1-3)$$

$$\triangle MBC \text{ 面积上 } F_z = P_z dA = P_z \cdot \frac{1}{2} dx dy$$

$$\triangle ABC \text{ 面积上 } F_P = P dA$$

F_P 是斜向的总静压力, 将其投影在 x 、 y 和 z 坐标轴线上, 分别为 F_{Px} 、 F_{Py} 和 F_{Pz}

$$F_{Px} = F_P \cos(x-yz) = P dA \cdot \cos(x-yz)$$

$$F_{Py} = F_P \cos(y-zx) = P dA \cdot \cos(y-zx)$$

$$F_{Pz} = F_P \cos(z-xy) = P dA \cdot \cos(z-xy)$$

式中: $dA \cos(x-yz)$ 在数值上等于 $\triangle ABC$ 在与 x 轴线垂直的 YMZ 平面上的投影面积,

即等于 $\triangle MAB$ 的面积($\frac{1}{2}dydz$);

$dA\cos(y-zx)$ 在数值上等于 $\triangle ABC$ 在与 y 轴线垂直的 ZMX 平面上的投影面积,即等于 $\triangle MAC$ 的面积($\frac{1}{2}dx dz$);

$dA\cos(z-xy)$ 在数值上等于 $\triangle ABC$ 在与 z 轴线垂直的 XYM 平面上的投影面积,即等于 $\triangle MBC$ 的面积($\frac{1}{2}dx dy$)。

这样

$$\begin{aligned} F_{Px} &= \frac{1}{2} P dy dz \\ F_{Py} &= \frac{1}{2} P dz dx \\ F_{Pz} &= \frac{1}{2} P dx dy \end{aligned} \quad (1-4)$$

单元体 MABC 所受的重力

$$dG = \gamma dV = \gamma \cdot \frac{1}{6} dx dy dz$$

(1-5)

按题意,单元体处于静平衡状态。作用于 $\triangle ABC$ 面积上的 F_P 总静压力在 x 、 y 和 z 坐标轴方向上投影的 F_{Px} 、 F_{Py} 和 F_{Pz} ,分别与相应坐标轴方向侧面上的作用力之和等于零。

$$\begin{aligned} \Sigma F_x = 0 \quad \frac{1}{2} P_x dy dz - \frac{1}{2} P dy dz = 0 \quad P_x - P = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \quad \frac{1}{2} P_y dz dx - \frac{1}{2} P dz dx = 0 \quad P_y - P = 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$\Sigma F_z = 0 \quad \frac{1}{2} P_z dx dy - \frac{1}{2} P dx dy - \frac{1}{6} \gamma dx dy dz = 0 \quad P_z - P - \frac{1}{3} \gamma dz = 0$$

当单元体三个互相垂直的边 dx 、 dy 和 dz 都趋向于零时,即单元体就以 M 点为极限。此时

$$P_x = P_y = P_z = P \quad (1-7)$$

这就证明,静止水柱内任意点上的静水压力在各个方向上都是相等的。

特性 3 静水柱压力是水的重度和水柱垂直高度的函数

静水柱压力是由静水柱的单位体积重量和垂直高度形成的。其数学表达式为:

$$P_{hy} = \gamma H \quad (1-8)$$

式中: P_{hy} ——静水柱压力 (N/m^2 或 Pa); H ——静水柱垂直高度 (m); γ ——水的重度 (N/m^3)。

水的重度,或称重率、容重,是指单位体积水所具有的重量

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-9)$$

式中: V ——重量为 G 的水体体积 (m^3); G ——水的重量 (N)。

处于地球重力场中的水受到地球吸引力。所以水重量的计算式为:

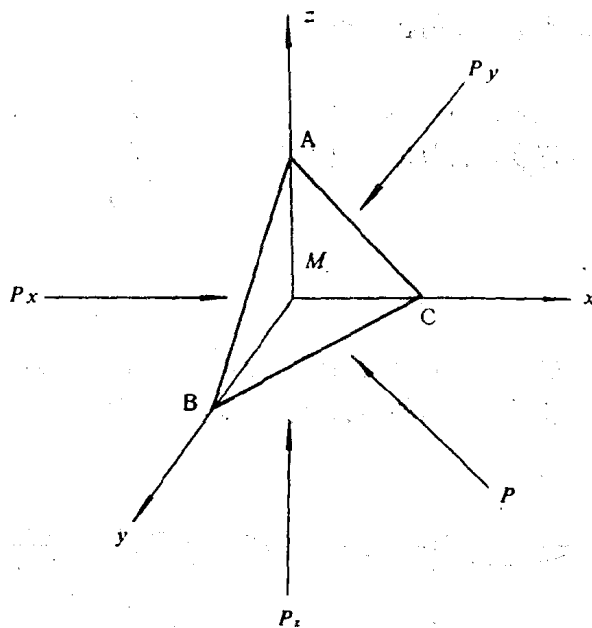


图 1-2 静水体微单元体

$$G=mg \quad (1-10)$$

式中: m ——水的质量 (kg); g ——重力加速度 (m/s^2)。

水的质量与水的密度相关, 其关系式为:

$$m=\rho V \quad (1-11)$$

式中: V ——质量为 m 的水体体积 (m^3); ρ ——水的密度 (kg/m^3)。

水的密度是指单位体积水所具有的质量。将式 (1-10)、(1-11) 代入 (1-9), 得

$$\gamma=\frac{mg}{m/\rho}=\rho g \quad (1-12)$$

代入式 (1-8), 得

$$P_{hy}=\rho g H \quad (1-13)$$

静水柱压力计算公式表明, 静水柱压力只与静水重度和静水柱垂直高度相关, 而与静水柱的粗细和盛水容器的形状无关, 如图 1-3 所示。

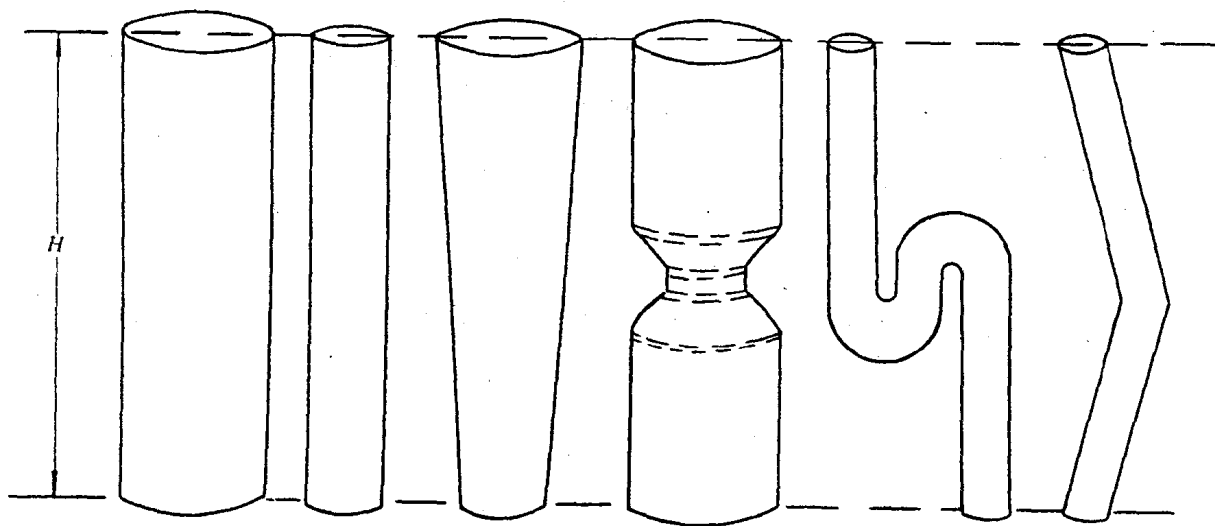


图 1-3 $P_{hy}=f(H,\gamma)$ 示意图
(据 A. Whittaker, 1985)

静水柱压力计算式中使用单位的不同, 将有不同单位换算系数的表达式

$$P_{hy}=C\gamma H \quad (1-14)$$

式中: C ——单位换算系数, 见表 1-1。

表 1-1

P_{hy}	γ	H	C
kPa	kg/m^3	m	0.0098
bar	kg/dm^3	m	0.098
psi	lb/gal	ft	0.0519

特性 4 静水柱压力梯度受水中溶解的盐和气体浓度以及温度差异的影响

由式 (1-8) 得静水柱压力梯度:

$$\frac{dP_{hy}}{dH} = \gamma \quad (1-15)$$

上式表明, 静水柱压力梯度值就等于静水的重度。为便于理解这种数值间的关系, 可将重度的单位变换为:

$$\gamma: \left(\frac{N}{m^3} \right) = \left(\frac{N/m^2}{m} \right) = \left(\frac{Pa}{m} \right)$$

其含义为地层埋深每增深 1 米的压力增长值。在油藏工程中, 常用的静水柱压力梯度单位是 kPa/m。因此, 凡影响水重度的因素也就影响着静水柱的压力梯度。水中溶气浓度越高, 水温越高, 静水柱压力梯度就越小; 水中含盐度越高, 静水柱压力梯度就越大。水的含盐度以 ppm 度量, 但通常表示为 mg/l。静水柱的含盐度范围为 0—642 798ppm, 前者为淡水, 后者为含盐湖白云石的咸水。大多数油藏水的含盐度极少超过 350 000ppm (3.5%), 所以此值可以用作油藏水的平均含盐度。砂岩中油藏水含盐度通常随埋深而增加, 其变化值为 80—300mg/(l·m)。总之, 水的含盐度随储层的沉积环境 (岩性) 及埋深而异, 如表 1-2。

表 1-2 静水柱压力梯度随油藏水含盐度的变化关系

油藏水类型	含盐度氯化物 (mg/l)	NaCl (ppm)	正常压力梯度 (kPa/m)	油藏水类型	含盐度氯化物 (mg/l)	NaCl (ppm)	正常压力梯度 (kPa/m)
淡水	0	0	9.795	典型的近海岸水	65 287	107 709	10.519
微含盐水	6 098	10 062	9.840		79 065	130 457	10.632
	12 287	20 273	9.908		93 507	154 286	10.790
	24 921	41 120	10.044		108 373	178 815	10.948
					123 604	203 946	11.084
海水	33 000	54 450	10.134		129 320	229 878	11.242
盐水	37 912	62 554	10.202		155 440	256 476	11.401
	51 296	84 638	10.338		171 905	283 643	11.559
	64 987	107 228	10.496		188 895	311 678	11.717
				饱和盐水	191 600	316 140	11.740

(据 A. Whittaker, 1985)

压力梯度的极微变化就可使某个深度上的地层压力产生很大变动。因此精确的压力梯度值对获得油藏压力数值是极其重要的。

典型的静水柱压力梯度值变化范围是 9.727—12.057kPa/m; 世界性的静水柱平均压力梯度值为 10kPa/m。

C. 压力单位

1. 压力单位

按式 $\bar{P} = ma/A$ 及 $ma = F$, 所以压力 P 的单位为 N/m^2 , 称为帕/(Pa)。

1Pa 单位太小, 油藏工程中通常用 kPa 或 MPa。

2. 液柱高与压力间转换关系

由式 (1-8)

$$H = \frac{P}{\gamma} \quad (1-16)$$

这就是液柱高与压力间相互转换关系式。这样，在已知液体单位体积重量的条件下，按上述关系式，就有两种方法表征物体单位面积上承受作用力的情况：用压力表示或者用液柱高表示。

式 (1-16) 中， P/H 即为压力梯度。鉴于压力梯度只与液体单位体积重量有关，所以将单位液体体积重量 N/m^3 ，在形式上写成 $\frac{N}{m^3}$ ，即在数值上成为压力梯度的含义。例如表 1-2 中的淡水，其密度为 $1000kg/m^3$ ，重度为 $9806.65N/m^3$ 。

1m 淡水柱所形成的压力

$$P = 9806.65 \times 1 = 9806.65Pa$$

9.80665 kPa 的压力以淡水柱高度表示时

$$H = 9.80665 \times 1000 / 9806.65 = 1m$$

重度为 $9806.65N/m^3$ 淡水柱所能形成的压力梯度为：

$$\gamma = \frac{P}{H} = \frac{9806.65}{1} = 9806.65Pa/m = 9.80665kPa/m$$

世界性平均石油柱所能形成的压力梯度值为 $9.05kPa/m$ 。

在油藏开发中，将世界性静水柱平均压力梯度值作为经验法则估算油藏埋藏深度的压力值

$$\frac{P}{H} = 9.80665 \approx 10 kPa/m = 0.010MPa/m$$

即：世界性静水柱平均压力梯度为每加深 1m 压力增加 10kPa，或者每加深 100m 所能形成的压力值为 1MPa。

估算油藏埋藏深度压力值的经验法则

$$P_f = 0.01H \cdot SG \quad (1-17)$$

式中， P_f ——油藏压力 (MPa)； H ——油藏埋藏深度 (m)； SG ——相对密度，物质的相对密度定义为在常压 (0.101MPa) 和 20℃ 时该物质的密度与常压和 4℃ 时水的密度之比，或定义为相同温度下任何体积的这种物质的质量与同体积的水的质量之比 (气体的相对密度常由对氢气或空气的比值给出)。

例如：

- 1) 油藏水相对密度 SG_w 为 1.074，油藏水柱高 1000m，其压力为：

$$P_w = 0.01 \times 1000 \times 1.074 = 10.74MPa$$

- 2) 石油相对密度 SG_o 为 0.85，石油柱高 1000m，其压力为：

$$P_o = 0.01 \times 1000 \times 0.85 = 8.5MPa$$

1.1.3 油藏压力和油井井底压力

A. 油藏压力

油藏开发过程中，油藏潜在能量的主要表现形式是油藏压力，即油藏孔隙空间中流体所承受的压力，或称为作用于油藏孔隙空间中流体上的压力。

在油藏工程中，油藏压力分为原始油藏压力、油藏静压力和油藏动压力三种。原始油藏压力是油藏尚未投入开发前的平均压力；在钻进过程中，可借助钻杆测试 (RST) 资料来确定。

油藏静压力是指油藏在初期开发过程中,把全部生产井都停止生产很长一段时间,待油藏处于稳定状态下的平均压力。随着油藏开发,生产井数增多,油藏静压力的实测可能性越来越小;另一方面在采油过程中,由于液体渗流,消耗掉一部分油藏能量,关井停产后所恢复起来的稳定压力,一般只能是接近或小于原始油藏压力。油藏动压力是指油藏按一定井网开发过程中,将其中某口生产井关井停产,待井中压力恢复稳定后,测试该井油层中部所得的压力值,或将测试资料通过绘图并计算后所得的最终稳定压力值。油藏动压力通常混称为油藏压力。这种方法所得的压力值,实质上是该生产井泄油面积范围内的平均压力。

据统计资料,世界性油藏压力梯度值为:

最高值: 20.30—22.60kPa/m;

最低值: 4.50—6.80kPa/m;

平均值: 9.90—11.75kPa/m

B. 油井井底压力

油井井底压力是指井中流体柱对井所钻穿的油层中部的回压。按生产井的生产状况,油井井底压力分为井底静止压力和井底流动压力两种。在油藏动压力测试中所读取的或计算所得的关井后恢复起来的稳定压力,实质上应称为该生产井的井底静止压力。与井底静止压力相当的非自喷井中的液柱高称为该井的静液柱高度。井底流动压力是指正处在开采过程中的井筒里流动流体柱对油层中部的回压力。

$$\text{井底流动压力} = \left(\begin{array}{c} \text{井口} \\ \text{压力} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{井筒内流动} \\ \text{液体柱压力} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{井筒内流体流动} \\ \text{所损失的压力} \end{array} \right)$$

式中的井口压力就是油管压力,它是由采油树上端的压力表读出的压力。井口压力的含义是流体由井周围流入井中并上升到井口后所剩余的压力。

与井底流动压力相当的非自喷井中的液柱高,称为井的流动液柱高度。在油藏开发中,井底流动压力就称为井底压力。井底压力值低于油藏压力值。油藏压力和井底压力之差称为生产压差,或简称压差。凭借压差,克服阻碍滞留流体向井底流动的阻力。属于这类阻力和因素的有:(1)流体和孔隙通道壁之间的摩擦力;(2)流动本体的内摩擦阻力;(3)流体向井底流动所经路程的长短;(4)油藏中两相和三相流体运动所致有效渗透性的降低;(5)滞留流体的毛管力。

按井底压力名称来理解,井底压力不仅是指生产井开采过程中流动流体柱对油层中部的回压概念,还应含关井后井筒里压力恢复过程中井底压力随时间变化的某一瞬间的压力。由此,井底压力就是生产井中压力从井底静压力降低的开采过程中,或从低于井底静压力关井恢复过程中的瞬时压力值。

1.1.4 异常油藏压力

A. 异常油藏压力含义

油藏内某个代表深度上实测的静液柱压力(P_{hy})。与该深度的静水柱压力值(P_{hy})_i之比用压力比系数 F_p 来表征

$$F_p = \frac{(P_{hy})_a}{(P_{hy})_i} \quad (1-18)$$

如 $F_p=1$, 称为正常油藏压力; $F_p \neq 1$, 称为异常油藏压力。 $F_p > 1$, 定义为高异常油藏压力, $F_p < 1$, 称为低异常油藏压力。图 1-4 指示高、低异常油藏压力存在的区间。油藏异常高压的极限值是上覆岩层和孔隙空间中流体所形成的压力。文献中有 $F_p=2.3$ 的超压异常油藏压力的报导。

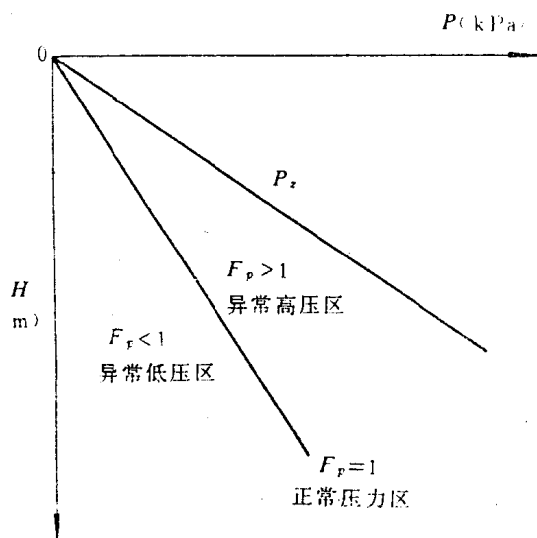


图 1-4 几种油藏压力值区示意图

据 P. E. Gretener (1979), 所有压力梯度变化在 9.727—10.858kPa/m 范围内的流体压力都算是正常的。因此, 异常油藏压力梯度的范围是:

$$10.858 \text{ kPa/m} < \frac{dP}{dZ} < 9.727 \text{ kPa/m}$$

据 W. H. Fertl (1976), 通常在油气钻井时可能遇到的典型的平均静水柱压力梯度范围是: 9.840—10.519kPa/m。因此

$$\frac{dP}{dZ} > 10.519 \text{ kPa/m} \quad \text{属异常高压}$$

$$\frac{dP}{dZ} < 9.840 \text{ kPa/m} \quad \text{属异常低压}$$

据 J. M. Hunt (1979), 按水的平均古含盐度 325 000ppm 计算, 正常静水压力梯度为 11.989kPa/m。大于 12.057kPa/m 为异常高压, 小于 9.795kPa/m 为异常低压。

据 D. Dickenson (1952), 任何压力超

过含有 80 000mg/l 溶解固体的水柱 (从地下圈闭地层延伸到地表) 的静水压力即称为异常高压, 等于或小于这个压力的地层则被认为是正常的或者低异常的。

顺便指出, 油藏压力在油藏工程中是指储层孔隙空间中流体所承受的压力。从石油地质勘探角度来看, 油藏压力概念扩而广之称为孔隙流体压力, 后者表征作用于地下多孔介质孔隙空间中流体的压力。在孔隙流体压力概念的使用上, 它既可指油藏储油层中流体的压力, 又可指非储油层如泥岩体中流体的压力。从这个意义上来说, 异常油藏压力即意味着异常孔隙流体压力。

B. 上覆岩层压力

油藏所承受的上覆岩层压力, 是覆盖在油藏以上的全部岩层及其孔隙空间中流体的总重量所造成的压力。上覆岩层压力 P_z 可表示为:

$$P_z = g \int_0^H \rho_{b(z)} dz \quad (1-19)$$

式中: $\rho_{b(z)}$ ——依岩层埋藏深度而变的岩体密度 (kg/m^3); 它是岩层基质密度 ρ_{ma} 和岩层孔隙空间中流体密度 ρ_f 的函数, 即

$$\rho_b = (1-\varphi) \rho_{ma} + \varphi \rho_f \quad (1-20)$$

式中: φ ——岩层孔隙度 (f)。

当以单位岩层体积平均重量值表示时

$$P_z = 0.0098 \bar{\gamma}_s H \quad (1-21)$$

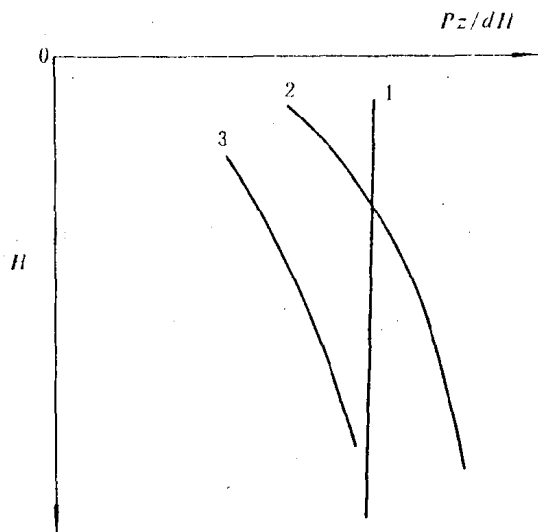


图 1-5 正常情况下泥岩-砂岩层系复合地层压力梯度与深度关系

(据 W. H. Fertl, 1976, 经选择)

1—常数压力梯度; 2—美国圣巴巴拉海峡;
3—北海地区

岩层重度 N/m ³	岩层压力梯度 kPa/m
21 560	21.56
22 540	22.54
22 638	22.63
23 520	23.52
24 500	24.50
30 380	30.38

C. 上覆岩层有效压力

在上覆岩层压力作用下, 储层颗粒骨架和孔隙空间中流体受力的简化情况如图 1-6 所示。

图中: τA ——颗粒与颗粒之间相互接触面积;

$(1-\tau) A$ ——孔隙空间中流体与颗粒间相互接触面积。

按 K. Terzaghi (1920), 单位面积上三个作用力之间的平衡关系式为:

$$P_z = \lambda P'_o + (1-\lambda) P_f \quad (1-23)$$

$$\lambda P'_o = P_o \quad (1-\lambda) P_f \simeq P_f$$

令

式中: P_z ——上覆岩层压力 (kPa); γ_b ——饱和流体岩层单位体积平均重量 (kg/m^3); H ——上覆岩层厚度 (m); 0.0098——单位转换系数。

上覆岩层平均压力梯度

$$\frac{\Sigma P_z}{\Sigma H} = \frac{\Sigma 0.0098 \gamma_b H}{\Sigma H} \quad (1-22)$$

世界性测试资料表明, dP_z/dH 随埋藏深度增大而增大。图 1-5 表示上覆岩层压力梯度的变化形态。图中曲线 1 是一条铅垂线。它的压力梯度不随埋深变化, 而是一个常数值。

沉积岩层密度 $\rho_{b(z)}$ 的变化范围一般在 $2200-2500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之间, 与其相应的重度 $\gamma_{b(z)}$ 近似值为 $21\ 600-24\ 500 \text{ N}/\text{m}^3$, 如表 1-3。一般可采用上述数值的平均值 $\bar{\rho}_{b(z)} = 23\ 100 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\bar{\gamma}_{b(z)} = 22\ 620 \text{ N}/\text{m}^3$ 。由 $2\ 200-2\ 500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的沉积岩层密度变化范围所致的相应的岩层压力梯度计算结果列于表 1-3。

文献资料表明, 在碎屑岩层中, 可能的最大上覆岩层压力可以高达 $30.51 \text{ kPa}/\text{m}$ ($\gamma_b: 30\ 510 \text{ N}/\text{m}^3$, $\rho_b: 3111.1540 \text{ kg}/\text{m}^3$)。

表 1-3

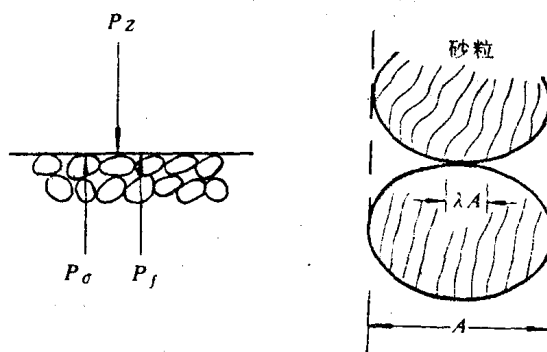


图 1-6 弹性储层

(据 J. Bear, 1972)

$$\text{则} \quad P_s = P_e + P_f \quad (1-24)$$

式中: P_s ——上覆岩层压力 (Pa); P_e ——作用于固体颗粒间的压力 (Pa); P_e ——上覆岩层有效压力 (Pa); P_f ——油藏压力 (Pa)。

这就是油藏中上覆岩层压力、上覆岩层有效压力和油藏压力的平衡关系式。

用压力梯度形式表示时

$$\frac{dP_s}{dH} = \frac{dP_e}{dH} + \frac{dP_f}{dH} \quad (1-25)$$

式中: $\frac{dP_s}{dH}$ ——上覆岩层压力梯度 (kPa/m); $\frac{dP_e}{dH}$ ——上覆岩层有效压力梯度 (kPa/m); $\frac{dP_f}{dH}$ ——油藏压力梯度 (kPa/m)。

由式 (1-24) 可知, 所谓上覆岩层有效压力就是指上覆岩层压力和油藏压力的差值。其计算公式为:

$$P_e = P_s - P_f \quad (1-26)$$

C. 油藏中 Terzaghi 的三力平衡关系图

P_s 、 P_e 和 P_f 三种压力间的平衡关系可由图 1-7 示意。

从图中可知:

1. 在正常油藏压力 ($P_f = P_{hy}$) 情况下, 储层颗粒骨架承受或支撑着上覆岩层的有效压力

$$P_e = P_s - P_{hy} = \Delta P_i$$

从岩层压实角度来看, 凡是储层处在这种上覆岩层有效压力 (正常压实压差 ΔP_i) 作用下的压力状态者称为正常压实储层。

2. 在上覆岩层压力恒定时, $dP_e = -dP_f$, 油藏压力 (P_f) 的任一增大或减小, 都会引起上覆岩层有效压力的变化。

3. 上覆岩层有效压力是引起岩层压缩的压力, 只要油藏中存在着油藏压力小于上覆岩层压力的情况, 岩层就承受上覆岩层有效压力的作用。

4. 原始油藏压力的降低, 压缩储层颗粒骨架的上覆岩层有效压力就增大, 储层更显压实, 目前的上覆岩层有效压力为:

$$P'_e = P_s - P_f$$

$$\because P_f = (P_f)_i - \Delta P = P_{hy} - \Delta P$$

$$\therefore P'_e = P_s - [(P_f)_i - \Delta P] = [P_s - (P_f)_i] + \Delta P = P_e + \Delta P$$

式中: $(P_f)_i$ ——原始油藏压力, $(P_f)_i = P_i - P_{hy}$, ΔP ——原始油藏压力的降低值。

由式可知, 目前的上覆岩层有效压力比原始的上覆岩层有效压力增大 ΔP 值, 即 $P'_e > P_e$ 。

5. 在异常油藏压力 ($P_f < P_{hy}$ 或 $P_f > P_{hy}$) 情况下, 储层将经受异常的压实, 称之为异常压实储层。

在低异常油藏压力条件下

$$P_f < P_{hy}$$

$$P_{hy} - P_f = \Delta P \quad P'_f = P_{hy} - \Delta P$$

上覆岩层有效压力为:

$$P'_e = P_s - (P_{hy} - \Delta P) = (P_s - P_{hy}) + \Delta P = \Delta P_i + \Delta P$$

此时, 储层颗粒骨架将承受高异常上覆岩层有效压力, 即比正常压实压差多出一个附加压差 ΔP 。在这种高异常上覆岩层有效压力作用下, 储层更紧压实, 称之为紧压实储层, 如图

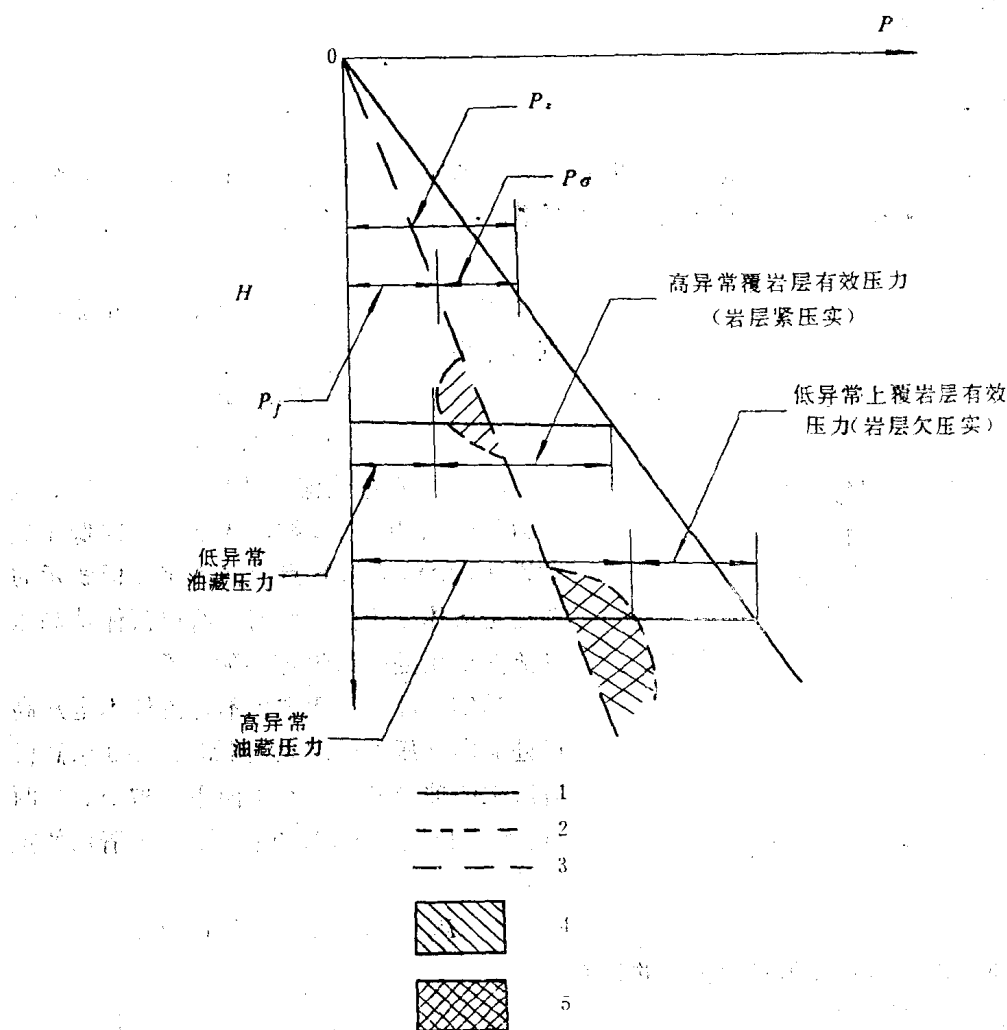


图 1-7 P_s 、 P_σ 和 P_f 平衡关系

1—上覆岩层压力；2—静水柱压力；3—异常压力；4—高压异常区；5—低压异常区

中的中间曲线段所示。

在高异常油藏压力条件下

$$P_f > P_{hy}$$

$$P_{hy} - P_f = -\Delta P \quad P_f = P_{hy} + \Delta P$$

上覆岩层有效压力为：

$$P_\sigma = P_s - (P_{hy} + \Delta P) = (P_s - P_{hy}) - \Delta P = \Delta P_i - \Delta P$$

此时，储层颗粒骨架将承受低异常上覆岩层有效压力，即比正常压实压差少一个减弱压差 ΔP 。在这种低异常上覆岩层有效压力作用下，储层较弱压实，称之为欠压实储层，如图中的下端曲线段所示。