



石油地质学

下册

地质出版社

石油地质学

下 册

〔美〕 A. I. 莱复生 著

地 质 出 版 社

Geology of Petroleum

A. I. Levorsen

(Second edition 1967)

Printed in the United States of America

石 油 地 质 学

下 册

〔美〕A. I. 莱复生 著

地质总局书刊编辑室编辑

地 质 出 版 社 出 版

地 质 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1975年12月北京第一版·1978年2月北京第二次印刷

统一书号：15038·新115 定价 1.30元

引 言

每个油藏的历史可以分为一个静止的时期和一个动力的时期。至今曾经考虑过的静止要素，如储集岩层、油贮内的流体及控制着油藏位置的圈闭等。这些要素曾在长时期内成为静止状态，当油贮内的变化慢慢进行时，其中的流体反映了地壳运动、火成岩活动、超载负荷及减轻负荷、以及水力循环的速度和方向。一旦这个油藏被发现并开始开采油气时，平衡就被破坏，这时油藏可以说是进入了动力时期，在这个时期中，变化很快。在静止的与动力的状态之间，差别的程度是有所不同的，主要是流体稳定的程度。在静止时期内的改变很缓，甚至不易察觉，只能从研究油贮内的条件以及在动力时期内进行的变化，才能推断。

关于油贮内的大部分知识是从石油工程人员的工作中、流体的采出以及对其温度和压力变化的测定而获得的，在这方面的资料很多。与工程人员有主要关系的，是以尽可能低的费用从油藏内生产出尽可能多的油和气。这样，一定要研究出油的油贮内的油气运动，石油地质人员应把它当作实验室的条件；而这个油藏可考虑为好象较大盆地或含油气区内的小型实验室。了解一下当油气被采出时，油贮内所发生的情况，可以有助于了解油气浓集到油气藏时的情况，从而有助于发现其他油气藏。以下两章是论述当从储集层中采出流体时伴随着的动力现象：压力和温度的变化，流体位能梯度的发展、相互作用或流体力学。

第三部分 油贮动力学

目 录

第三部分 油贮动力学

第九章 油贮条件——压力和温度.....	1
第十章 油贮力学.....	48

第四部分 石油的地质历史

第十一章 石油的成因.....	117
第十二章 石油的运移和聚集.....	158

第五部分 石油地质学的应用

第十三章 地下地质学.....	210
第十四章 含油气区.....	249
第十五章 石油勘探.....	283

附 录

一、石油勘探的词汇解释.....	287
二、术语缩写.....	294
三、油田水的密度表.....	299
四、油品的比重及重量的换算表.....	300

第九章 油贮条件——压力和温度

油贮压力：压力测定—压力梯度—压力的来源—压力的变化。温度：温度测定—地温梯度—温度测定的用途—热能的来源—热能的影响

压力和温度是影响每个油贮的两种主要的时常变化的条件，而且每种条件都是一种潜在的可以利用的能量。随着这两种条件的变化，受到它们影响的岩层的容积也起变化，而最重要的是岩层中所含的流体的体积发生变化。两地区之间的流体压力和温度差别，决定它们的压力梯度和温度梯度，而压力梯度和温度梯度对于石油和天然气在岩层中的移动关系很大。这种移动可以使油和气聚集而形成油气藏，也可以使油气从油气藏流入井内。采油工程的一大部分就是和压力、体积及温度打交道——平常总起来说就是和PVT打交道。油贮中气体体积的变化最为显著，但是其他两种流体——水和油的体积也有变化，而组成储集岩层的各种物质虽然也有变化，但其程度较差。异常的流体压力梯度和温度梯度表示位能已变为动能，也就是说油贮内正起着变化。

粘度和浮力是石油与天然气的两种特性，对于它们在充满水的岩层的连通孔隙中流动时有很大的作用。粘度和浮力随压力和温度而变化，而压力和温度则一般随深度而增加。在这两种油贮条件中，压力的作用可能要比温度大一些。它们都影响到油贮中流体的体积，因此也就影响了相对浮力，但是其中压力的影响要大些，特别是对于天然气来说更是如此。温度增高的主要效果，就是降低液体粘度，而降低粘度能使液体比较容易流动。

油 贮 压 力

储油层孔隙中的各种流体总是处于一定的压力之下，这种压力通常叫做油贮压力⁽¹⁾、流体压力、或地层压力。可以从测定单位面积内流体对油井穿过的储油层面上所加的力来计算这种压力。在叙述压力大小时，常用磅/平方吋压力 (psi)，或磅/平方吋绝对压力 (psia)^①，或大气压(等于14.7psi的倍数)为 单位。因为在同一系统内的所有流体是互相接触的，所以它们能随时传递压力，因此对某一种流体测得的压力，实际上就等于全部流体所承受的压力。油贮压力还有其他一些叫法如：井底压力、水压、关井压力、井压及“岩层”压力。虽然这些名称并不一定恰恰等于“油贮压力”，但是笼统说来，它们大致可以说是一样的。

“岩石”压力这个名词，以前论文上用作与流体压力相当，这个名词没有量测或计算上覆的岩层柱状负荷压力的涵义。

静水压力梯度对淡水(比重1.0)系统为0.433磅/平方吋/呎。其关系可用压力-深度图解表示，如图 9-1, A。如果水中含有溶解的盐分，比重就会比淡水高(见附录表A-1)，结果，这样的水流系统的静水压力梯度将大于淡水系统的压力梯度(磅/平方

- ① 缩写“psi”通常和“psig”的意义相同，后者表明磅/平方吋表压单位，把psi或psig折算成psia时，只需要加上地面的大气压力。下表所列 为 不同高度的平均大气压力：

高度 (呎)	大气压力 (psi)	高度 (呎)	大气压力 (psi)
0	14.7	6,000	12.0
1,000	14.2	7,000	11.7
2,000	13.6	8,000	11.3
3,000	13.1	9,000	10.9
4,000	12.6	10,000	10.1
5,000	12.1		

在准确的工程计算中，特别是涉及到计算气体体积的时候，都用psia为单位。

吋/呎), 而且在压力-深度图上以压力梯度线表示出来时, 其倾斜度比淡水的静水压力梯度的为小。在一个敞开系统的表面上, 如湖面, 水的压力是零磅/平方吋; 这就是说在敞开系统的表面上, 流体压力就是大气压力。对于一个封闭的静水系统 (图9-1, B) 来说, 如果其中的水是均一的, 而且密度和在敞开系统的一样。那么, 水的压力梯度也将是一样的, 但是在流体压力为零磅/平方吋 (即大气压力) 的高程, 可能高于或低于地面。高程参照普通的基准面, 如海平面, 这时量测的流体压力被称为基准高程。流体压力绘于压力-深度图上, 在其有关基准高程方面, 为研究一个盆地或一个局部勘探区域内的油贮单位的流体位能环境提供适宜的方法。

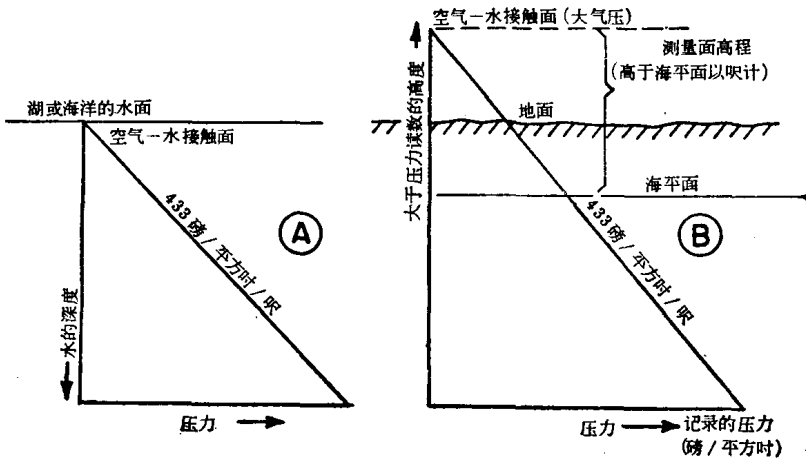


图 9—1 在敞开系统内的流体压力

A是单位面积的力受水柱作用, 由测压点向上到自由空气-水接触面——例如湖面或海面。在一个限制系统内, 如B, 任何一处深度的压力乃是每个单位面积所承受水柱的力, 从测压点向上到一个设想的空气-水接触面的测计数, 测压面高程, 可能高于或低于地面。纯水 (比重1.0) 在水柱深度内为0.433 磅/平方吋/呎压力

除非另有规定，油贮压力一般都是指原始能力，即地层静止压力平衡被生产所扰动之前的油贮中的压力。要直接测定油贮的原始压力，只有靠钻进油贮中的第一口井，因为当油贮中的油、气一经采出时，油贮中的压力便开始下降。而当一口生产井关闭时，油贮压力又会开始上升。开始时压力上升很快，以后逐渐转慢，一直到最后达到最高压力时为止。所谓最高压力就是指静止井底压力，亦即关井压力，或称静止地层压力。如果关井的时间不够长而不能达到最高压力时，我们可以根据压力曲线的外推法求得最高压力。生产井的静止井底压力一般总低于油贮的原始压力。关井压力与原始油贮压力之差，就是衡量油贮压力降的尺度。喷油压力，亦称井底喷油压力，是在油井采油时测定的；喷油压力和静止压力之差叫差异压力。套管压力即井口压力，乃是当油井关闭使其恢复压力时在井口套管内部的静止压力。根据套管压力就可以算出油贮压力，其方法就是把井眼里可能有的空气、天然气、油及水柱的总重加起来。油管压力就是采油时井口油管里面的压力。它可能是静止压力（例如在关井时所测得的），在这种情况下它就等于套管压力；但是它也可以在油井喷油时测定。当天然气绕过了油而冲出时，油管压力便增加，因为这时气体的密变小于油的密度。回压就是油井采油时所要突破的压力，也就是对喷油压力所加的阻力。回压等于地面的磅/平方吋表压加上井内流体柱的压力。

对于采油工程人员来说，采油时发生的油贮压力的变化是十分重要的。一般说来，压力随流体的排出而降低。单位采气(油)量的压力递减率是估计储量、最高产量以及生产率的一些很好资料。如果压力降低得很快，那就表明油贮的体积可能很小；如果压力降低得很慢，那就说明油贮可能是很大的。因此，及早了解油贮压力降的情况，对于估计油贮可以利用的能量和产油潜力关系很大。这样看来，压力的测定是采油工程上不可缺少的措施。在这里，主要谈油贮原始压力、造成原始压力的原因以及它们的某些作用。关于采油时压力变化的情况，将在第十章内谈到油贮

力学时详细讨论。

油贮的原始压力和岩层中历来的含水情况有密切的关系。如果从区域范围来看,岩层里的油、气含量同含水量比起来真是微乎其微,事实上可以说大多数油藏和气藏都是在含水层里的。水不仅可以作为油、气聚集成油藏时所必须通过的介质,而且也是油层压力从一个区域到另一个区域的主要传导体。水可以被认为是存在于连通的渗透性岩层中的连续的相态。在渗透率极低的页岩和较细粒岩石中,水只成为几个分子厚的一层薄膜存在。在渗透性更好的岩层——即含水层中,水占去岩石体积的10—40%。由于油藏和气藏通常是密切地与储集层中的水相伴生,因而地下水中的压力现象有许多是和石油地质学中的是相同的。

1. 压力的测定

油贮压力可以从好几方面表现出来。在用顿钻钻进的井中,任何一点水的压力都是很明显的,因为在所有含水层中一般都有足够的压力使井里的水柱保持在一定的高度,或甚至于使水流出井口。在钻这些井的时候,地层只经受大气压力加上少量钻井水的重量,所以这时地层水就很容易流入井里。地层水进入井内的流量可以用提捞法测定,在这种情况下,可以把每小时从井中提出的水的筒数(No/B/Hr)写在钻井记录中。同时还要把停止提捞时水在井中上升的高度记录下来,而这个高度显然取决于水的压力。这就叫做静水面。如果水充满了井眼,那就在钻井记录中写成“井中水满”(HFW)。许多渗透性差而出水慢的地层,只要有比较长的时间,也可以把井灌满。

在灌满泥浆的旋转钻井中,测压问题就不同了。为了要使井壁保持高于油贮的压力,泥浆一定要配制得比水重得多。如果不这样做,油贮里的流体便会进入井眼而把泥浆挤出井口。现在已经发展有好几种装置用来把测压仪器贴在井壁上,以便即使在井中灌满泥浆时也能记录油贮压力⁽²⁾。这些就是能自动记录的压力计,有时叫做深井压力计,是放在测试器上下入井内的。在测定

压力时，先在测试器上面放一个封隔器把泥浆和油层隔开，然后进行油层压力的测定。如果要在泥浆清除以后而在正在采油的井里测定油层压力，可以把深井压力计放在油管里对着油层的地方。

计算关井压力时，我们也可以在井口顶部测定套管压力，然后再加上从井口到油层的流体柱重量。如果液柱顶部距井口有一定的距离，则计算流体柱重量时可以在液柱重量之外再加上液面与井口之间空气的重量。如果井里全是气体，要测定井底或油层的压力⁽³⁾，可以将一定气体在一定温度下的磅/平方吋重量加上在井口测定的表压即得。

测量压力的设备随着测量深井内高压的需要不断增加而增进。在南路易斯安那⁽⁴⁾ 16,112 呎深处的 18 呎厚砂岩层中测得凝析气压力为 11,690 磅/平方吋，而井底压力据估计约为 15,000 磅/平方吋。

2. 压力梯度

这里将讨论两种流体压力梯度。第一是静水压力梯度，即在测得流体压力的位置之上的含水层内的水随深度而增加的压力。第二是水动力压力梯度或流体位能梯度，它存在于有水流动的含水层中。如果这个含水层的测压面是水平的，那么就可以说，这一系统是在静水压力均衡状态下；而地层水是静止的。若测压面是倾斜的，那么可以说，该系统是在水动力均衡下；这时水是流动的。

(1) 静压梯度 在大部分油层内，静压梯度平均每深 100 呎约为 45 磅/平方吋；这是对于水中含有 55,000 ppm(毫克/升)的溶解盐而讲的(见附录表 A-1)。梯度高到 100 磅/平方吋/100 呎的也曾出现于某些油层之内；但是这样的梯度可以认为不是由于上覆水柱的重量而是由于上覆岩石的重量所引起，因为其压力梯度约为 100 磅/平方吋/100 呎。

有些油层内流体静压的实例表示于图 9—2，这些流体压力是

测自南部阿肯色州的斯玛考弗石灰岩内的十个油藏，梯度平均约为52磅/平方吋/100呎。斯玛考弗层内盐水比重为1.22，相当于52磅/平方吋/100呎及地面测压面的高程。沿美国墨西哥湾海岸虽然测到过较高的压力梯度，但平均地面静压梯度一般取 46.5 磅/平方吋/100呎。从委内瑞拉东部的大奥菲西纳区的一群油藏内测得的油贮压力，如图9—15所示。

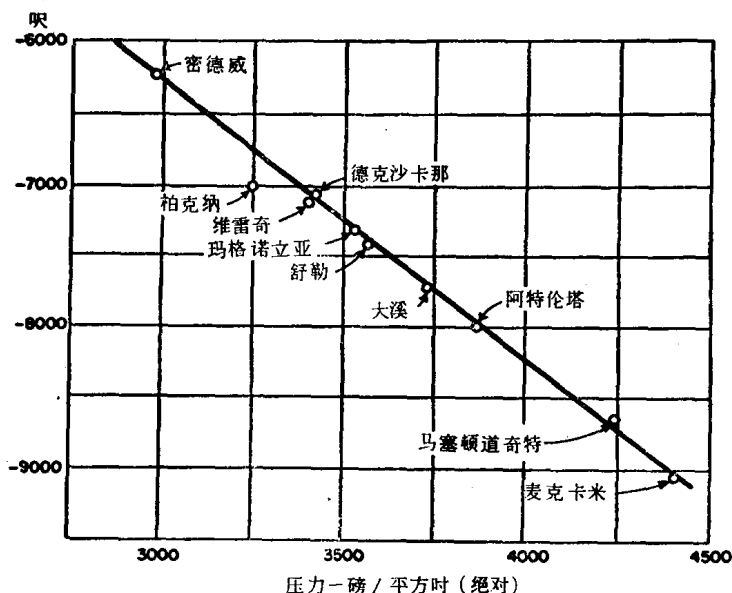


图 9—2 阿肯色南部10个油藏（都从侏罗纪斯玛考弗石灰岩产油）中油层深度与原始压力的关系图

这些油贮所产盐水的比重为1.22，相当于0.52磅/平方吋/呎的压力梯度。

油贮压力是有关盐水柱的静止压力，而盐水的密度是与油贮盐水一样

〔按《美国矿冶工程学会会报》第155卷（1944年），第 91 页，图 4 重绘〕

当油贮压力将含水层内的水驱使上升到含水层顶部之上而被井钻穿时，这种水就称为自流水；如果水流出井口，这口井就称为自流井。水在井内上升，当其重量显示压力等于油贮压力时，这口井便可以当作压力计。根据承压水在同一含水层内的不同地点所钻的井内上升的高度可以画出一个想象平衡面（一个大气压

的空气-水接触面)，被称为测压（位能测量）或压力测量（piezometric）面。当井内的水上升到某种高度而不能直接观察时，则任一地点的水的密度及油贮压力两者如果均为已知，则可计算出其测压面的高程。一口自流井所在地点，其测压面高出井所在的地面。

实例位置说明如图9—3所示。含水层的供水区高于排水区，测压面连结两区。一地区的测压面高于地面，通常称为“剩余压力区”。在这样的区内，水将从井口流出，并且是高于地面。在另一个区内，测压面比地面低——即一个“反常压力区”——水将停留在井内。

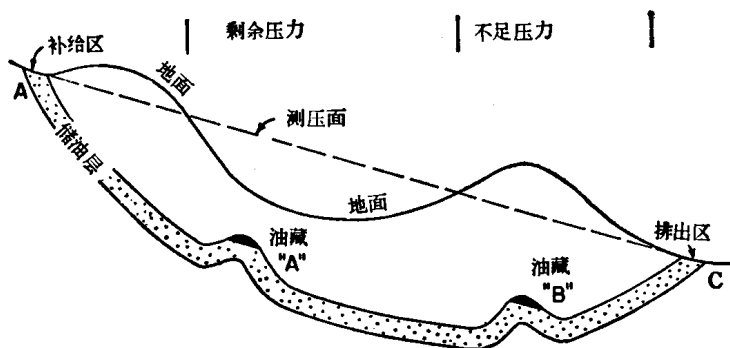


图 9—3 表示造成地面下油贮过剩压力或不足压力的测压面和地面的关系图

剖面长度达几百英里。在此简单模型中，水动力条件是存在的，水是沿着倾斜的位能测量面（测压面）从A点流向C点

（2）动压力梯度 在讨论水动力条件中，复杂的名词常会引起混淆和误解。所遇到的困难是由于压力和梯度的概念。“压力”一词往往不正确地被用来指作流体位能，这同把“压力梯度”当作位能梯度是同样的错误。严格对待水动力学的概念及名词，M. K. 休伯特曾提出过重要论文⁽⁴⁸⁾。

休伯特指出流体压力和流体位能之间的关系是：

$$\Phi = gz + \frac{p}{\rho},$$

式中 Φ ——流体位能

g ——重力常数

z ——压力测量位置的基准高程

p ——静止流体压力

ρ ——参考的流体密度——通常是水。

流体位能与压头或位能测量面 (h) 有关, 关系如下:

$$\Phi = gh,$$

两边都除以 g , 则得下列方程:

$$\frac{\Phi}{g} = h = z + \frac{p}{\rho g}$$

这种关系, 普通用于变换流体压力为流体位能数值, 以 h 代表之, 也就是压头的位能测量面。如果 $\rho g =$ 梯度 p , 参考的流体静压梯度就可用于变换。在真正地质位置中关于参考的流体密度的一种假定也象水的密度在任何水文地质系统中一样, 是永远不变的。在实际应用上, 假设在任何已知水文地质系统中所有流体压力按照所有系统内水的密度永远不变的假定, 变换成位能测压面的数值, 无论如何, 总有少许误差, 但是如果注意两个压力测点之间已知密度的数值, 则在局部位置可作适当的校正。

压力是在单位面积上对力的量测。不同的流体压力将存在于分开的个别参考高程而连通的流体系统之中, 即使这里的流体不流动——这是当有静水条件存在时的情况。如果流体压力在同一参考高程内存在着差别, 于是流体位能也就有差别, 而流体动力条件就占优势。在不同参考高程测量出来的流体压力可以用已知的相应静压梯度 (ρg) 校正为在同一参考高程的流体压力。如果校正以后, 流体压力的差别仍然存在, 那么流体动力条件在这个系统内仍占优势。

在实践中, 研究含水层的区域性及地区性的流体动力条件, 正常地是以测压面从有利地区的流体压力测量而计算出来的。这个

解释是以测压面图表示的，即用等高线连接流体位能相等或测压面高程相等的各点。在这个系统内的水的流动就可以描绘出来，系垂直于测压面等高线的方向，从测压面高的地区向测压面低的地区流动。换言之，在含水层内的水，沿测压面的倾斜面向下流动。

石油勘探时，在压力资料的实际应用中，如果流体压力测量已经作过二次或二次以上，则材料的解释即根据这些测量是否在同一油贮、在同一井内或在同一含水层内，以及是否在同一深度和在同一时间或在不同时间内测量的。例如静止油贮压力测量往往是在同一口井内于不同的时间来测定流体压力数据，用以决定油贮的生产特性，以油贮内每下降一磅/平方吋压力时，能产油多少桶来计算。如果在一口井内同时测量不同含水层的流体压力，假定计算出来的测压面的高程，对于所有测过的地层压力是一样的，那么，这些含水层即处于局部的静水压力平衡之下。但是，如果在测得流体压力的不同含水层中，其测压面的高程不同，那么，在这些含水层间就一定有流体动力梯度的存在，并且如果含水层之间有可渗透的通道、如由断层、裂隙或不整合面所造成的，则地层中的流体即可沿着这些通道流动，从含水层中流体位能相对较高处流向那些流体位能相对较低处。同样地，如果单一含水层的区域性压力研究显示位能测量面是水平的，那么这个系统就是在流体动力平衡之中；假设测压面是倾斜的，那么，就存在有流体动力梯度，并且流体将沿渗透性通道从高流体位能地区流向低流体位能地区（见图9—4及9—5），一个类似的情形可于城市自来水系统中见到，当所有水龙头关闭时，测压面是水平的，如果有一个开着，这里压力减低，就形成流体位能梯度，水就向开着的水龙头流去。

流体动力条件如果存在于沉积盆地内，可出现两种基本的形式：（1）一个含水层中有不同的流体位能存在时，则含水层中的水即沿层理面而流动；及（2）在地层剖面内，含水层之间的流体位能不同，将使流体向上或向下流动，经过渗透性通道穿过层

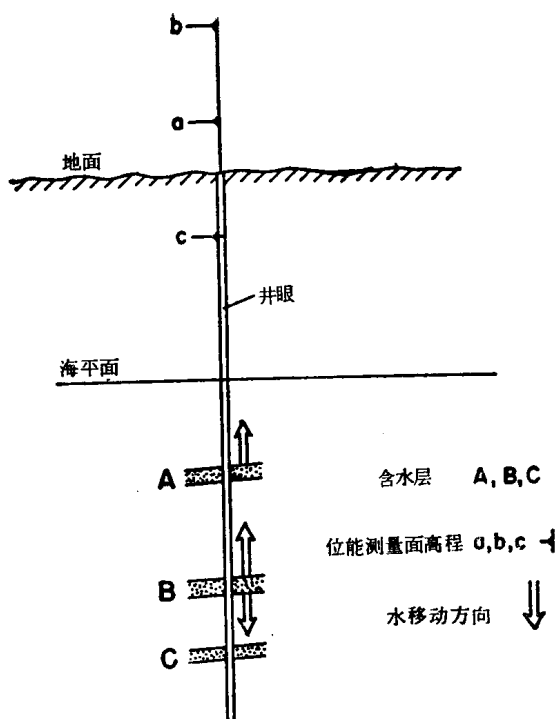


图 9—4 在一口井中三个含水层A、B、C具有不同的测压面
a、b、c

箭头表示如果渗透路径有效时，流体流动的方向

理面，从含水层中流体位能较高处流向流体位能较低处。在油贮系统内，一切油藏或气藏之所以被圈闭是受已经存在的地质条件中的一种或两种环境的流体动力所控制，一个含水层中流体位能梯度的证据是倾斜的测压面。一个含水层内垂向流体位能梯度的证据是一个含水层的测压面的高程和在同一垂直岩层剖面内不同深度的其他含水层的不同（见图9—4）。在一个储油岩层内，流体位能梯度可认为有两种一般来源：（1）人为的流体位能梯度，在一口生产井或一个油藏内及其附近，由于流体被采出的结果而致该处流体压力降低，及（2）区域性的天然流体位能梯度（见图9—5）。