

〔苏〕Г. Г. 瓦希托夫 等著

低于饱和压力下的 油田开发

科学技术文献出版社

27719

TE 311
005

低于饱和压力下的 油田开发

Г. Г. 瓦希

〔苏〕 B. П. 马克西

P. T. 布尔加科夫

王

科学技术文献出版社

1986

内 容 简 介

本书根据新的物理概念和油井开采的结果较明确地介绍了确定饱和压力的方法,阐述了概率统计的方法,研究了在井底压力低于饱和压力下各种因素和可能的渗流机理对饱和压力值的影响,列举了在井底压力低于饱和压力下提高油井产能的理论和矿场研究的资料。

该书适用于石油与天然气工业中从事研究、设计和油井开采的科技人员。

DD45/17
Разработка месторождений
при забойном давлении ниже
давления насыщения
Г. Г. Вахитов-Рин
Москва. «Недра». 1982

低于饱和压力下的油田开发

王如义 译

刘丁增 等校

科学技术文献出版社出版

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092毫米 32开本 7.625印张 163千字

1986年12月北京第一版第一次印刷

印数: 1—2000册

科技新书目: 133—58

统一书号: 15176·758 定价: 1.80元

译 者 的 话

该书是由苏联一九八二年莫斯科《矿藏》出版社出版，全书共分六章，由王如义翻译。各章校对人：第一、二、三章罗昌燕，第四、五章张克有、赵耀五，第六章刘丁增。

由于水平有限，难免有错误和不足之处，恳切希望广大读者批评指正。

前 言

众所周知，原油的饱和压力在油田开发过程中是重要特征之一，它通常在PVT筒中测定，没有考虑孔隙介质的影响。

在五十年代中期无论是对热动力不平衡的程度，还是对饱和压力的大小都注意到孔隙介质可能的影响。

目前进行了很多研究，其中部分研究认为有孔隙介质的影响，而另部分则认为没有这个影响，各种研究结果的不同说明进行实验的条件没有对比性；另外，现有测定饱和压力的方法，特别是在孔隙介质中的测定方法不够精确，也是一个原因。

采用不同的方法保证提高测定饱和压力的试验精度：一种是采用原先没应用过的物理测量的方法；另一种是采用新的整理方法；第三种是根据试井资料，用概率统计的方法确定饱和压力。为了完善这些方法必须研究不同因素对饱和压力的影响。

为了合理的开发油田，除饱和压力大小以外，必须搞清井底压力高于和低于饱和压力下可能的渗流机理，以及在井底压力低于饱和压力下提高油井产量的试验研究、理论研究和矿场研究的方法。

根据阿塞拜疆、鞑靼和西西伯利亚油田开发的资料，我们进行了类似的研究。

在此书编写中，应用了姆·阿齐兹别科夫阿塞拜疆石油

化工所、鞅鞅石油联合企业和西伯利亚石油科学研究所的研究成果，以及其它象H. M. 拉菲别伊 利，A. M. 萨 迪 霍 夫，O. П. 拉基莫夫，И. M. 莫尔杜哈耶夫，B. M. 雷日 克，O. B. 热尔托夫，B. H. 马尔托斯，T. C. 斯捷帕诺 娃，M. C. 拉 扎 马塔，C. Г. 阿格耶夫和其他学者的研究成果，作者对 他 们表示感谢。H. B. 秋拉耶夫和З. M. 佐林参加了第四章一些节的编写，作者在此也表示感谢。

这些范围内研究结果不一致，必然引起读者们的不同反映，作者们希望，书中阐述的结果，必将引起研究人员和生产工程师们对这个重要问题的注意。

目 录

译者的话

前言

第一章	确定饱和压力的方法	1
第1节	确定饱和压力的常规方法	1
第2节	确定饱和压力的新方法	5
第3节	根据油藏开发的资料确定饱和压力	17
第二章	影响饱和压力的因素	36
第1节	<u>孔隙介质</u> 对饱和压力的影响	36
第2节	地层系统 <u>相态</u> 的变化	54
第3节	孔隙介质对饱和压力影响的机理	58
第三章	油气系统 <u>不平衡热力学</u> 特征的研究	73
第1节	<u>压力降低的速度</u> 对饱和压力的影响	73
第2节	根据不平衡数值确定平衡的饱和压力	81
第3节	油气系统的物理化学性质对其热力学特征的影响	83
第4节	在计算油气系统不平衡相变时应用相同的模型	91
第5节	油藏模型不平衡消耗的试验研究	99
第四章	<u>混气液渗流过程</u> 的特点	108
第1节	气液系统的不平衡过程	108
第2节	<u>孔隙介质</u> 对气液系统动力效应影响的试验研究	116
第3节	<u>混气液渗流过程</u> 中的不平衡效应	126
第4节	憎水孔隙介质中混气系统的渗流特点	135
第5节	憎水毛细管表面的亲水化对气泡渗流的影响	140
第6节	混气原油渗流异常的可能原因	141
第7节	非牛顿性质对原油采收率的影响	145

第 8 节	混气液渗流时滞后的计算	160
第五章	相转变的不平衡对开发指标和试井 结果的影响	165
第 1 节	相转变的不平衡对不稳定渗流驱动的影响	165
第 2 节	在不平衡热动力条件下混气液渗流的计算	169
第 3 节	在两相渗流条件下试井的特点	174
第 4 节	在自喷井中油气混合物的流动	181
第 5 节	根据井口资料识别地层-油井系统	185
第 6 节	张弛原油油藏衰竭驱动的特点	188
第 7 节	憎水储集层衰竭驱动的特点	194
第六章	确定饱和压力的研究成果在矿场的应用	199
第 1 节	饱和压力的预测	199
第 2 节	根据饱和压力预测地层压力	207
第 3 节	提高油井生产能力	215
第 4 节	井底压力低于饱和压力下油田开发的一些特点	227

第一章 确定饱和压力的方法

饱和压力是代表油田特征和决定油田开发过程的最重要参数之一。大约在六十年代之前，实验室采用的各种测定饱和压力的方法，基本上都没有考虑孔隙介质的影响，随后发表的文章都考虑到饱和压力与孔隙介质的性质和孔隙介质参数的关系，然而直到目前对这个问题还没有共同的想法。这是因为：第一，在孔隙介质中确定饱和压力没有可靠的方法；第二，它受很多因素的影响，有些因素实验时无法考虑。

例如，通常在计算中，天然气在液体中的溶解度采用常数。然而，用白俄罗斯社会主义共和国科学院的研究确定空气在水中随时间的溶解系数变化为1.5~2倍，它同卫星电功率的变化有关。

很自然所有这些，在评价系统的计算特点时必须考虑。

第1节 确定饱和压力的常规方法

在一九四六年，根据美洲的比尔油田地层原油研究资料统计整理的结果，根据原油密度和油气比曾编成了确定饱和压力的图版。

斯捷金格（1947年）和列泽特（1958年）还考虑了温度和溶解气密度编成了图版。应该指出，类似的方法应用范围很窄。例如，阿塞拜疆研究的地层原油资料同比尔、斯捷金格、列泽特图版的资料对比表明，所确定饱和压力的误差超

过50%，对阿塞拜疆原油就不能采用这种方法。

K. B. 维诺格拉多夫 (1952年) 为了确定含气原油的饱和压力，在综合分析阿塞拜疆许多油田，1000多个地层原油样品的结果后，曾经编成了类似于比尔的图版，其误差不超过9%。

对于阿塞拜疆原油，根据H. A. 特里武斯公式确定溶解天然气的数量：

$$\begin{aligned}
 Q = & (0.0325 - 0.000018 p) p + (0.14 p + 0.000022 p^2) \\
 & \times (0.93 - \rho_n) + 4.75(0.1 p - 25)(0.98 - \rho_n)^2 \\
 & - \{ [0.001 + 0.0094(0.93 - \rho_n) + 0.04(0.93 - \rho_n)^2] \\
 & - [0.00000019 + 0.0000022(0.93 - \rho_n)] p \} \\
 & \times (t - 40) + \{ 0.034 p + 0.000085 p^2 (\rho_{pr} - 0.62) \\
 & + [0.12 p + (0.0011 p^2 - 0.38 p)(\rho_{pr} - 0.62)] \\
 & \times (0.93 - \rho_n)(\rho_{pr} - 0.62) \} \quad (I. 1)
 \end{aligned}$$

其中：Q——溶解天然气的数量 (米³/米³)；

p——压力 (兆帕)；

ρ_n ——脱气原油密度 (克/厘米³)；

t——温度 (°C)；

ρ_{pr} ——溶解气的相对密度。

建立的 $Q = Q(p)$ 关系式，通常在应用体积法时可以确定饱和压力。公式的应用范围：压力小于 22.0 兆帕，温度 20~100°C，原油密度从 0.820 到 0.950 克/厘米³，对于 $p < 10.0$ 兆帕，溶解气的相对密度为 0.55 到 1.10，对于 $p > 10.0$ 兆帕，溶解气的相对密度从 0.55 到 0.90。

下面是根据沿井筒密度分布研究的结果确定含气原油饱和压力的方法。它的实质在于建立沿井筒的密度分布曲线，形成曲线折点是由于原油密度分布的规律不同。气体开始从

原油中分离出的深度有深有浅。该方法的缺点是不能用于含水油井。除此之外，必须对温度进行校正。

在井底压力大于饱和压力和脱气点在油管鞋以上很多时，根据试井资料确定饱和压力是适用的。对于在没有油嘴的情况下，油井以一种工作制度较长时间工作以后，在油管和套管之间的环形空间应当形成静态平衡，油管鞋附近的压力用下列公式确定：

$$p = \rho_g h + p^* \quad (1.2)$$

其中： $\rho_g h$ ——在管外空间中液柱高 h 的静水柱压力；

p^* ——在管外空间中气柱压力。

为了进一步解决这个问题采用拉普拉斯气压公式：

$$p_{\pi} = p_y \exp \frac{g \rho_{or} (H - h)}{RT_{cp} z_{cp}} \quad (1.3)$$

其中： ρ_{or} ——在管外空间中气体的相对密度；

R ——气体常数；

T_{cp} ——在管外空间中沿深度 $(H - h)$ 气体的平均温度；

z_{cp} ——沿深度气体的平均压缩系数；

h ——在管外空间中液柱高度；

p_y ——井口压力。

联合解方程式 (1.2) 和 (1.3) 得到：

$$p_{\pi} = p_y \exp \frac{g \rho_{or} \left(H - \frac{p - p^*}{g \rho} \right)}{RT_{cp} z_{cp}} \quad (1.4)$$

其中： ρ ——井筒液体平均密度。

在上述的方法中没有考虑孔隙介质对油气混合物饱和压力的影响。

常温下，建立在高压粘度计中测定气液混合物粘度是改善试验方法之一。在实验系统中提高压力时，天然气在液体中的溶解度增加，照例引起粘度的下降。气液混合物的粘度在饱和压力下最小，提高压力会使粘度增加，粘度曲线的拐点相应的压力就是气液系统的饱和压力。然而对于许多原油在曲线上没有看到明显的转折，说明这个方法精度降低。

根据从含气液中分出气泡的观察，在高压室中通过观察窗目视确定气液系统的饱和压力。对于确定从液体中开始分出的气体的主观见解，是这个方法的不足。

体积法确定饱和压力是最简单的常见方法。在通过气液系统时，从单相到两相状态的变化，得到该系统的压缩系数：

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

绘制 ΔV 与 p 关系曲线。它是由两个地区组成的，第一个地区符合于系统的单相状态，而第二个地区符合于系统的两相状态。通过这些曲线的切线交点大致符合于气液系统的饱和压力。装置的操作和确定饱和压力简单，是这个方法的主要优点。测量方法的精度取决于确定从单相向两相状态过渡地区的精度。对于两相系统，相变区相应不大，而对多组分液体同多组分气体的混合物，相变区扩大。

超声波法是测定饱和压力最精确方法之一，在气液系统中的压力高于饱和压力时，超声波的分布类似于它从单相或均匀介质中通过一样，压力低于饱和压力时，系统中开始出现气泡。当超声波通过时，由于超声波在液气界面分散，使气泡吸附的超声波增多。

A. A. 鲍洛托夫，B. A. 别林斯基和其他的研究者们的研

究孔隙介质对气液系统饱和压力影响时采用了超声波法，并指出了它的应用条件，然而它的主要缺点在于对复杂试验装置要求细心的维护和操作人员专门培训，妨碍其广泛的推广。

测定饱和压力现有方法的概述，可以看出它有两个明显的不足：试验结果的精度低和无可比性。

第2节 确定饱和压力的新方法

在研制确定液体中开始分出气体（出现第一个气泡）和从气体中开始分出凝析油（出现第一个液滴）的瞬时，采用电位差法。参加该方法研制的有H. M. 拉菲别依里，M. C. 拉扎马托，Г. C. 斯捷帕诺娃。测定装置的流程见图1。

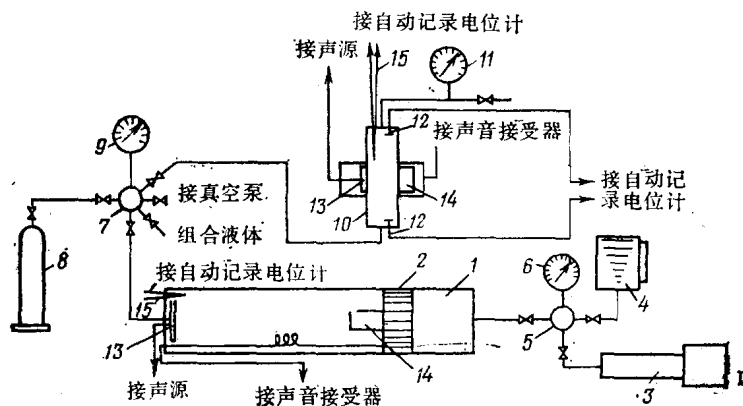


图1 电位差法测定饱和压力装置的流程

曾采用目视和超声波作为对比的方法。装置的主要部分——玻璃管1，计算的工作压力为0.6兆帕，在管子中确定了饱和压力。为了调整工作室的压力，管子里安装带有橡皮

密封圈的有机玻璃活塞 2，在工作室里用泵 3 建立了压力，从槽子 4 经过闸门座 5 供给活塞空间甘油，在闸门座上安装了一个 1 兆帕的标准压力表 6。

在管子 1 中移动液体经过闸门座 7，为此在管子 1 中预先建立真空，气体从气瓶 8 中通过闸门座 7 流向管子 1。

在闸门座 7 上安装了 0.6 兆帕的标准压力表 9，在装有孔隙介质的容器 10 中，经过闸门座 7 在孔隙介质中实现了饱和液体的转移，在孔隙介质的出口处安装了 0.6 兆帕的标准压力表 11。

在装有孔隙介质容器的两端安装了用银和青铜合金作的两个电极 12，隔离导线被连接在电极上，另一端被接通在自动记录电位计上。

既然作为比较的方法还采用了超声波法，那么传感器 13 和超声波接收器 14，无论安装在管子上，还是安装在装有孔隙介质的玻璃容器上，都保持 0.6 兆帕，在容器的上部为了观察出现的第一个气泡，留有不大的自由空间。为了记录温度，在管子 1 和容器 10 建立热电偶 15。

工作方法如下：用真空泵向管子 1 中注进液体，以后从气瓶 8 供给管子一定数量的气体。气体还没有完全溶解在液体中的时候，停止供给气而增加压力，不停顿的掺和混合物，直到气体完全溶解在液体中为止。以后在管子中逐步地降低压力，所有这些都是在不停地掺和混合物时进行的。在流体出现第一个气泡瞬时的压力就规定为饱和压力。应该指出，如果它没有掺合混合物降低了压力，那么饱和压力常比在掺合时（搅拌时）低，即具有过饱和点。当脉冲超声波通过管子时，即掺合了混合物，那么没有掺合的饱和压力同掺合的饱和压力相等。在研究丙烷-*n* 庚烷和丙烷-汽油系统时，在

强烈的掺合时，饱和压力与压降速度无关。

在图 2 和图 3 上指出的是测定饱和压力的结果。图 2 是在管子中用目视和体积法测定的一种情况。图 3 是对于丙烷-汽油系统用目视、超声波和电位差法测定的另一种情况，气体是由 0.6% 的甲烷，0.05% 的乙烷和 99.35% 的丙烷组成。

在上述两种情况下，可以看到用两种方法确定饱和压力值的一致性。应该指出，在该情况下用体积法时，可以看到在 $p = f(V)$ 曲线上很明显的转折，是由于丙烷在汽油中具有很好的溶解度。

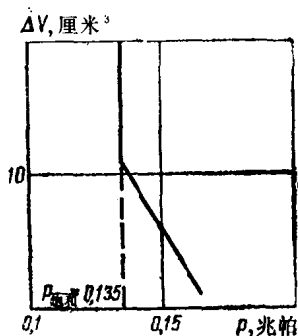


图 2 系统体积增量与压力的关系

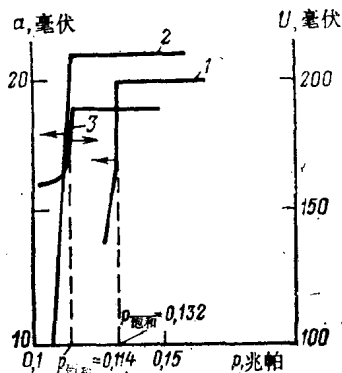


图 3 饱和压力的确定

- 1——采用超声波法（不在孔隙介质中）；
- 2——采用超声波法（在孔隙介质中）；
- 3——电位差法（在孔隙介质中）

确定饱和压力之后，在管子中再一次增加压力0.2~0.1兆帕，高于饱和压力，借助于真空泵把液体充满了容器10(见图1)。而以后从管子1中经过容器10使气体饱和了的液体开始流动。孔隙介质由65%的砂子和35%的粘土组成，为了确定电位差，把岩石润湿了。注入速度为100~150厘米³/小时，在注入6~8倍孔隙体积之后，在带有孔隙介质容器中的压力下降了。降压的速度不大于0.1兆帕/小时。同时根据测量方法来确定孔隙介质两端的电位差，或脉冲声波变化的振幅。

在液体通过孔隙介质时，在电效应的作用下，孔隙介质中产生了电位差。在产生第一个气泡的瞬时，介质的电阻急剧的增加，引起电位差的明显突降，在这瞬时观察到了第一个气泡的出现。在电位计输入电阻增加30毫欧以后得到了曲线3(图4)。在这种情况下电位的突变在刻度上确定，因此是最精确的。

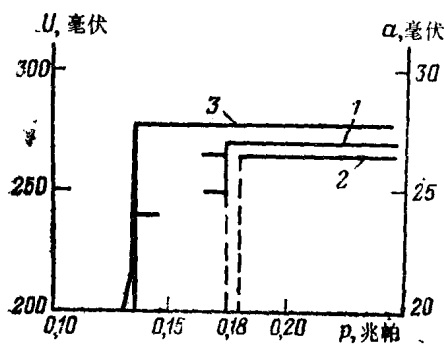


图4 在混合温度下对于丙烷-n丁烷系统用电位差法测定饱和压力
1—— $t = 291.5\text{K}$; 2—— $t = 293\text{K}$,
3—— $t = 302.6\text{K}$

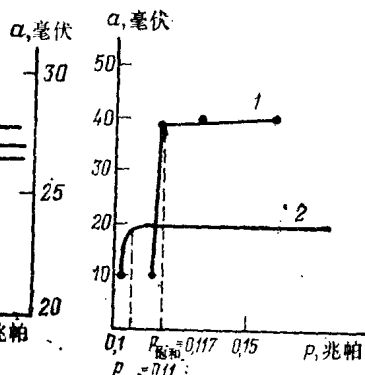


图5 用超声波法测定饱和压力

为了在孔隙介质中测定饱和压力，也采用了脉冲超声波振动（见图3）。根据超声波振动的振幅与压力（2）的关系，根据拐点确定孔隙介质中的饱和压力。其值等于0.114兆帕，同样借助于电位差（3）也得到饱和压力值。对于在同一混合物和相同温度条件下，在管子中用目视和借助于超声波确定的饱和压力等于0.132兆帕，在孔隙介质中对于汽油-丙烷（曲线1）和 n 庚烷-丙烷（曲线2）系统，在注入8倍孔隙体积以后（图5），得到了振幅与压力的类似关系。

在孔隙介质中，对于 n 庚烷-丙烷混合物的饱和压力为0.11兆帕，对于汽油-丙烷混合物在管子中可以观察到饱和压力为0.111兆帕，即实际上是一样的，孔隙介质的渗透率在这些试验中大约为1微米²。

所得到的结果证明，无论用电位差测量法，还是超声波法，都是十分精确的和可靠的确定第一个气泡脱出时刻的方法，根据信号的强度可以判断在气体分离过程中定性的变化。

既然每次试验测量的结果完全去掉偶然干扰的影响，在整理试验结果时，必须采用相应的数学模型，采用概率函数的理论方法可以提高确定饱和压力和凝析压力的精确性。此时作试验的装置仍然是以前的。在许多情况下（在孔隙介质憎水时），用电位差法确定饱和压力是不可能的。因此有必要对现有的方法进行改进。为此在采用体积法时，通常建立 p — ΔV 关系，有时描述不稳定的特殊过程。在研究分出气体的过程时，由于测量误差和试验装置结构的不完善，在筒中产生偶然性因素，而在有孔隙介质中形成另外一种干扰。以不稳定信号为背景的，这些偶然的波动要求采用这样的整理方法，该方法的干扰影响将是最小的。偶然过程的易变程度具有相关函数的特点。