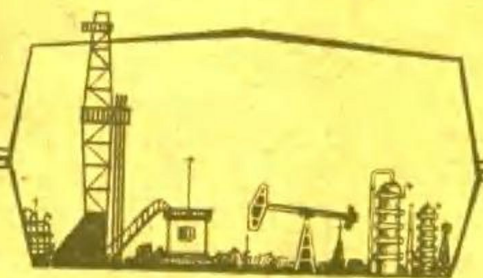


高等学校教学用书

采油工艺原理

王鸿勋 张琪 编



石油工业出版社

采油工艺原理

王鸿勋 张 琪 等编

石油工业出版社

采油工艺原理

王鸿勋 张 琪 等编

*

石油工业部教材编译室编辑 (北京902信箱)

石油工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

北京市印刷二厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18印张 448千字 印1—6.500

1981年12月北京第1版 1981年12月北京第1次印刷

书号: 15037·2314 定价: 1.90元

内 容 提 要

《采油工艺原理》一书是在《采油工程》和《采油原理》等书的基础上重新编写的。本书加强了工艺理论分析,使采油工程中一些主要参数的选择、工程效果及生产预测等,初步建立在一定的理论基础之上。在采油工程一系列问题的论述中,着重阐明了解决问题的思路、方法及改善的途径。书中还注意了反映新工艺、新技术在国外应用的情况。

本书为石油高等院校的教材,供采油工程及油田开发专业的师生使用,也可供有关专业的师生及科研和工程技术人员参考。

前 言

《采油工艺原理》是根据1977年底石油部在华东石油学院召开的石油院校教材会议的决定，由大庆、西南、华东石油学院三个院校联合编写的。在编写过程中，努力贯彻少而精、理论联系实际及反映新技术的原则。在教材内容上加强了基础理论。

《采油工艺原理》共分七章，即自喷、抽油、注水、压裂、酸化、砂蜡水和封隔器及管柱。它是在60年及65年石油院校编写的《采油工程》、《采油原理》教学实践的基础上重新编写的。为了适应具有我国特点的分层开采的需要，增加了封隔器及管柱一章，主要介绍了封隔器设计计算及管柱受力分析的基本概念。

随着采油工艺技术与理论的发展，在这次编写中对自喷、抽油、注水、压裂、酸化、砂蜡水各章，都作了程度不同的增删。共同的特点是尽量加强了工艺理论的分析，力图使采油工程中一些主要参数的选择、工程效果及生产预测等能够建立在一定的理论基础之上，以便提高学生从事采油工作的设计能力。

为了便于在教学中逐步培养学生分析、解决实际问题与从事科研的能力，在编写过程中尽可能阐明解决具体采油工程中某些问题的思路和方法，并提出了方法上存在的问题及改善的途径。

本书第一章自喷中的1~4节及第三章的注水，由大庆石院蒋汉青编写。第五章的酸化及第一章的第5节，由西南石院潘迎德编写。第七章的封隔器及管柱，由西南石院曾宪平编写。第六章的砂蜡水，由华东石院陈月明编写。第二章的抽油，由华东石院张琪编写。第四章压裂，由华东石院王鸿勋编写。西南石院袁兴柏参加了本书的定稿工作。华东石院采油教研室的一些同志也参加了这项工作。全书由华东石院王鸿勋副教授与张琪主编，由大庆石院副教授胡靖邦主审。西南石院副教授任书泉审查了第五章。

由于时间仓促，加上编写人员水平有限，书内错误之处在所难免。希望使用此教材的师生、读者提出批评指正。

目 录

前言

第一章 自喷	1
第一节 油井自喷原理	1
第二节 四种流动过程的衔接与生产协调	17
第三节 自喷井的生产分析	22
第四节 自喷井管理及分层开采	32
第五节 气举	35
参考文献	45
第二章 抽油	46
第一节 抽油装置和泵的工作原理	46
第二节 抽油机悬点运动规律	51
第三节 抽油机悬点载荷计算	56
第四节 影响泵效的因素及提高泵效的措施	68
第五节 抽油井生产分析	78
第六节 抽油设备选择及工作状况分析	89
参考文献	111
第三章 注水	112
第一节 水源及水处理	112
第二节 分层吸水能力的研究	120
第三节 注水指示曲线的分析和应用	126
第四节 防止吸水能力降低及改善吸水剖面的方法	134
参考文献	139
第四章 压裂	140
第一节 造缝机理	140
第二节 压裂液	148
第三节 支撑剂及裂缝导流能力	163
第四节 压裂设计	170
第五节 压裂工艺	182
附录一 非牛顿液体在裂缝中的流动	185
附录二 误差补偿函数表	186
参考文献	187
第五章 酸化	188
第一节 碳酸盐岩地层的盐酸处理	188
第二节 酸液及添加剂	203
第三节 酸处理工艺	211
第四节 砂岩油气层的土酸处理	215
参考文献	218
第六章 砂、蜡、水	219
第一节 防砂和清砂	219

第二节 防蜡和清蜡	231
第三节 找水和堵水	240
参考文献	254
第七章 封隔器及管柱	255
第一节 封隔器的设计	255
第二节 封隔器胶筒密封条件的分析	261
第三节 管柱的受力与变形	271
附录 变系数二阶微分方程 $\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$ 的解	279
参考文献	280

第一章 自 喷

油井完成之后，投入生产，用什么采油方法，是根据油层能量的大小和合理的经济效果来决定的。如果油层具有足够大的能量，不但能将原油驱入井底，还能将油从井底举升到地面。这种完全依靠油层天然能量将油采出地面的方法，称为自喷采油法。如果油层的能量不足以将油举升到地面，需要人工从地面补充能量进行开采，一般是以机械能量帮助油（液）举升到地面的，称为机械采油。如将高压压缩气体（空气或天然气）注入井内使油举出地面的，叫作气举采油法。用各种深井泵开采石油的称为深井泵采油法。

地层能量的大小又表现为地层压力的高低。即使地层原始压力足以使油井自喷，如果在自喷开采过程中得不到能量补充，必然逐步衰减到不能自喷，转为其它方法开采。我国油田多属于注水开发，用注水以维持地层压力和延长自喷期，所以从广义来讲，注水油田的自喷开采也可以认为是机械自喷开采。

从世界范围看，自喷井数量较少。但从产量来看，大多数自喷井产量比抽油井高，有的自喷井单井日产量高达几千吨，甚至上万吨，所以自喷油井产量在总产量中占的比重很大（参见表1-1）。

表1-1 各种开采方法占的比重（1977年）

国 别	自喷井（口）	机械采油井（口）	总井数（口）	产量（米 ³ /年）	单井平均（米 ³ /日）
美 国	31815	476525	508340	474668000	2.59
伊 朗	434	11	445	328659000	2051.5
伊拉克	187	3	190	131449000	1921
科威特	697	—	697	103569260	412
沙特阿拉伯	782	—	782	523298809	1858

由于自喷开采依靠油层的能量，所以自喷井地面设备简单，管理方便，产量也较高，因此是最经济的采油方法。大庆油田实行早期注水开发、开采近二十年，地层压力稳定，喷势旺盛，长期稳定高产。在我国，一个油田或油藏从投入开发起就把一个油田作为整体来考虑，所以能够采用合理的开发方案和先进的采油工艺技术，从而把充分利用天然资源和取得好的经济效益统一起来。

本章从油井开采的几个方面讨论自喷原理、自喷井基本分析和管理工作。

第一节 油井自喷原理

一、自喷井的能量与消耗

原油从油层流到计量站，一般要经过四种流动过程如图（1-1）所示。原油沿油层流入

井底；从井底沿井筒流到井口；通过油嘴；沿地面管道流至计量站。

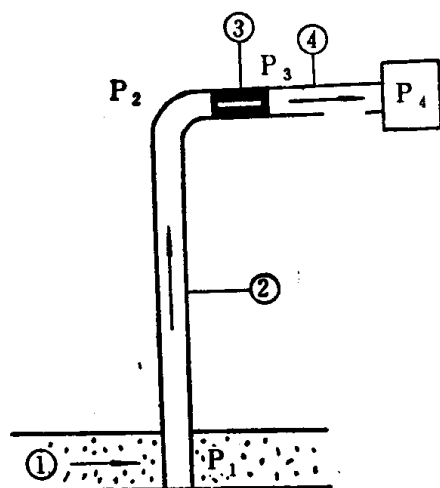


图1-1 自喷井的四种流动过程

这四种完全不同的方式，在流动过程中各自遵循的规律不同。沿油层流动为渗流；沿井筒的流动为垂直多相或单相管流；通过油嘴的流动为嘴流；沿地面管道的流动一般为多相水平管流。由于这四种流动过程同处于一个流动系统中，它们之间必然存在着互相联系又互相制约的关系。例如，井底压力就是渗流的末端压力，又是垂直管流的始端压力。

不论在哪种流动中，都存在能量供给及能量消耗的过程，只有了解能量供给与消耗的关系，才能控制不利因素，最大限度地利用有利因素，这是我们分析和管好自喷井的基础。下面分析自喷井在四种流动过程中的能量消耗的情况：

(1) 地层渗流 当井底压力高于饱和压力时为单相流动。当井底压力低于饱和压力时，则井底附近为多相渗流。在地层中渗流压力损失占地层至分离器总压降的10~50%。当油层渗透率高，井底附近无污染，流体粘度小，单相流动时，渗滤损失小；反之，渗滤损失大。

(2) 油井垂直管流 压力损失占总压降的30~80%。油井浅，油气比高，原油中不含水的，小产量井，则垂直管流损失小；井较深，油气比小，产量高的井，垂直管流损失大。

(3) 嘴流 油、气通过油嘴节流后的压力损失一般占总压降的5~30%。

(4) 出油管线流动 压力损失一般占总压降的5~10%。

上述情况表明，四种流动过程的性质不同，但在整个流动系统中，它们之间的压力是互相联系和制约的。其中垂直管流压力损失占的比重最大，所以着重研究垂直管中的流动。

二、垂 直 管 流

(一) 多相垂直管流的特点

当油井的井口压力大于原油饱和压力时，井中沿垂直管流动着的是单相原油。这种流动和普通水力学中单相垂直管流的规律是完全相同的。

原油从油层流到井底后具有的压力称井底流动压力（简称流压）。流压是地层油流至井底后的剩余压力，同时又是垂直向上流动的动力。从油层至井底渗流的压力损失，亦即地层压力与流压的差值变化幅度很大。假如地层压力很高，那么相应的流压也比较高。液体在该流压的作用下，不但平衡了相当于井深的液柱重量，且克服垂直流动的摩擦阻力到达井口，为

了继续将油送至计量站，油到井口后仍需保持一定的井口压力。根据上述情况，可写成：

$$P_f = P_H + P_{fr} + P_{wi}$$

式中 P_f ——井底流动压力，公斤/厘米²；

P_H ——液柱压力，公斤/厘米²；

P_{fr} ——摩擦阻力，公斤/厘米²；

P_{wi} ——井口压力，公斤/厘米²。

从上式可以看出，只有井底有足够高的流压，单相原油就可以自喷到地面。我国某高产油田，井口压力大于原油饱和压力，原油离开井口之后才能从其中分离出天然气。这样的油井属于单相垂直管流。一些注水开发油田的油井，含水达90%以上，液气比很低，基本上也可以看做是单相垂直管流。

单相垂直管流的能量来源主要是压力、能量消耗在克服液柱的重力和摩擦力。在单相水平流动的管路中没有克服液柱重力的能量消耗，而在垂直管中，井底压力大部分都消耗在克服液柱重力上，摩擦损失占的比重不大。如井深3250米，井底流压310公斤/厘米²，井口压力20公斤/厘米²，原油比重0.86，则：

$$310 = \frac{3250 \times 0.86}{10} + 20 + P_{fr}$$

$$P_{fr} = 10.5 \text{ 公斤/厘米}^2$$

摩擦损失仅占3.29%。这是在研究垂直管流中的一个值得注意的地方。

在油井中呈单相垂直管流的虽然有，但在数量上毕竟是少数。大多数的自喷井是气、液两相或三相（油、气、水）垂直管流。其中，当井底压力低于饱和压力时，则整个油管内部呈气液两相。如果井底压力高于饱和压力，井口压力低于饱和压力时，则油中溶解的天然气在井筒中某一高度上开始从油中分离出来，井中存在两个区域，下面是单相流，上面是两相流。分界面基本上（不考虑滞后现象）在饱和压力点的地方。

油井中增加了气相后，油气混合物在井中流动时和单相液体在垂直管中流型有较大的差别，使得流动中的能量供给与消耗的关系也变得复杂起来。气体从油中分离出来时，处于高压状态，随着油气流沿井筒上升，压力逐渐降低，气体随之膨胀，不断释放出气体弹性膨胀能量，该能量要参与举升液体。膨胀能的大小与气量多少、压力变化范围有关。在液气两相垂直接流动中，能量来源除压能外，气体膨胀能是个很重要的方面。在一些老油田里，流压很低，主要是靠气体的膨胀能来维持油井的自喷。

实践表明，并非所有的气体膨胀能量都可以有效地举油，要看气体在举升系统中做功的条件，如油气在油管里的流动结构。因此，要研究油气混合物在垂直管中不同的流动结构。因为不同的结构状态有不同的流动规律和不同的气体膨胀做功的条件，这一点不同于单相流动。

当油管中出现油气混合物后，混气液体在垂直管中的压力消耗，仍然是重力和摩擦力，但是转为油气两相的重力和摩擦力了。在单相垂直管流动中，由于液体在流动过程中体积不变（因为液体的压缩性小），各个断面的流速并不发生变化；而在多相垂直管流中，沿井筒自下而上随着压力不断降低，气体不断从油中分离出来，以及压力降低气相体积流量逐渐变大，所以混合物的流速与比重在垂直管内各断面是不同的。液气两相的摩擦阻力在垂直管内各断面也不一样，因此，要解决多相垂直管流的压力分布规律，首先要讨论液气两相在管内的流动结构。

(二) 油气混合物在垂直管中流动的结构

油气混合物在垂直管中自下而上地流动过程中，所出现的一些特殊现象，和油气的数量、压力高低、管径大小及油气性质有关。

如图（1-2 a）所示在井筒中从低于饱和压力的某点起，气体开始从油中分离出来，这时，由于此处压力高，气量少，气体都以小气泡状态分散在液相中，混合物的流动结构称为泡流，在这种情况下，这些小气泡对于油管尺寸来说是很小的。此时，由于油气比重的差异和油气混合物的平均流速在整个井筒中相对地小，因此，在混合物向上流动的同时，气泡的速度 V_g 大于液相的上升速度 V_L ，气泡从油中超越而过，这种气体超越液体的现象，称为滑脱。泡流的特点是：液体是连续相，气体是分散相，由于气泡的存在，降低了井筒中混合物的比重，在相同的井底流压作用下，可使液柱高度增加，但举液的作用（或称持液）却很小。

当混合物继续向上流动，压力逐渐降低，气体不断膨胀，小气泡合并为大气泡，直到能占据整个油管断面时，在井筒里形成一段油，一段气的结构，这种流动类型，称之为段塞流，如图（1-2 b）所示。这时气泡托着油柱向上流动，气体的膨胀能得到很好的发挥与利用。但是这种气泡举升液体的作用，很象一个破漏的活塞向上推油，在段塞向上运动的同时，沿管壁还有油向下流动（相对于气泡）。虽然如此，在油气段塞结构情况下，油、气间的相对运动比泡流小得多，滑脱现象也少了。在一般产量的油井中，段塞流动占很大的比重，甚至在井口都能听到这种出油的声音。

随着混合物继续向上流动，压力不断下降，气相体积继续增大，炮弹状的气泡不断加长，逐渐由油管中间突破，形成油管中心是连续的气流而管壁为油环的流动结构，如图（1-2c）所示称之为环流。在环流结构中，两相都是连续的，气体举油作用主要靠摩擦携带。

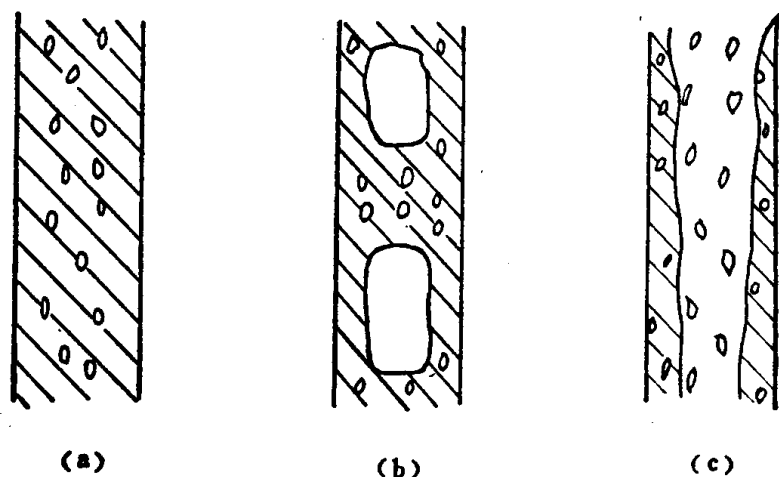


图1-2 油气混合物的流动结构示意图

a—泡流；b—段塞流；c—环流

在油气混合物继续上升过程中，压力下降，气体的体积流量继续加大，油管中央连续流动的气流芯子愈来愈粗，沿管壁流动的液环厚度愈来愈薄，绝大部分的油都以小油滴分散在气流中，这种流动结构称为雾流。这时，气体是连续相，而液体是分散相。气体以极高的速度携带油滴喷出井口。在雾流结构中， V_L 和 V_g 基本接近，油气间的相对运动速度差别很小。

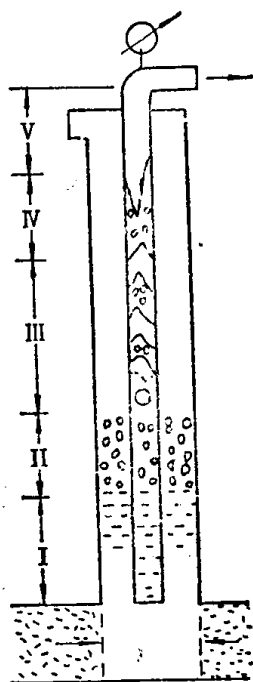


图1-3 油气沿井筒喷出时流动结构示意图

I—纯油流；II—泡流；III—一段塞流；IV—环流；V—雾流

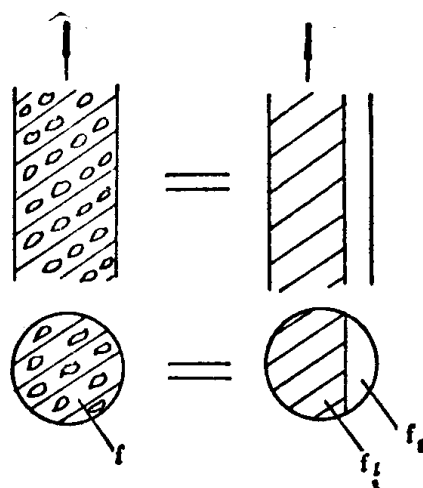


图1-4 混气液体流动示意图

按照以上的讨论，油井中流动结构如图 1-3 所示，自下而上依次为：纯油流、泡流、段塞流、环流、雾流。各种流动结构的出现，主要取决于井筒内压力变化情况和气量的多少。如果井底流动压力高于饱和压力，井筒下部会出现纯油流。对于油气比不高的井，出现环流或雾流的可能性就很少。

不同的油气流动结构，能量的利用和消耗是有区别的。由于在各种油气流动结构中，在一般油气产量下的油井中，摩擦阻力远较重力消耗为小。所以在混气液体流动中，研究重力的消耗是有意义的。对于高产油井，摩擦力可大到限制了油的产量，这时，主要是要解决阻力问题了。

重力消耗就是克服混气液柱重力所消耗的那部分能量。当油井的深度一定时，重力消耗的大小，显然取决于混合物的重度。混合物的平均重度可由下式来计算。

$$\gamma_m = \frac{Q_o \cdot \gamma_o + V_g \gamma_g}{Q_o + V_g} \quad (1-1)$$

式中 γ_m ——混合物的重度，公斤/米³；

Q_o ——油的流量，米³/日；

V_g ——气的流量，米³/日；

γ_o, γ_g ——油、气的重度，公斤/米³。

从上式看出，如果油、气流量的总和是一个单位体积，那么油流量愈大，混合物的重度就愈大。实际上，由于气体的重度很小，甚至可以忽略不计。因此，油井中气体的产量愈少，重力消耗也应该愈多。这种重力消耗是不可避免的，称之为有效的重力消耗。但等式 (1-1) 未考虑油气在有相对运动时，混合物重度的变化。

当液气的体积流量不变，存在气体超越油的速度时，会导致重力损失加大。为了便于分析这种现象，先考虑液、气流速相同时，液体和气体在油管断面上各占有自己的流动断面 f_l 、

和 f_g 如图 (1-4) 所示。显然 f_L 、 f_g 与液、气体积流量 Q_L 、 Q_g 成正比关系。混合物重度 γ_m 可用下式 (1-2) 表示。如果忽略气体的重度,混合物的重度取决于液相所占流过断面的大小,

$$\gamma_m = \frac{f_L \cdot \gamma_L + f_g \cdot \gamma_g}{f_L + f_g} \approx \frac{f_L}{f} \cdot \gamma_L \quad (1-2)$$

式中 f_L —— 液体所占的流过断面面积;

f_g —— 气体所占的流过断面面积;

f —— 管内流过断面的总面积。

存在滑脱现象时, 气体速度 V_g 大于液相速度。在体积流量 Q_g 不变时, 气体的流速快, 所占的流过断面要变小 ($Q_g = f_g \cdot V_g$, 当 Q_g 一定时, V_g 增大, f_g 变小), 而液相占有的断面增大, 克服重力消耗的能量也随之增加。这种由于滑脱现象出现重度增大所引起的附加重力消耗, 称为滑脱损失。亦可用下式表示:

$$\text{当 } V_g > V_L$$

$$\gamma_m = \frac{f_L' \gamma_L + f_g \gamma_g}{f} \approx \frac{(f_L + \Delta f_L) \gamma_L}{f} \quad (1-3)$$

式中 f_L' —— 存在滑脱损失时, 液体占的流过断面面积;

$\frac{\Delta f_L}{f} \gamma_L$ —— 垂直管单位长度上的滑脱损失。

于是单位管长上的滑脱损失为:

$$\text{滑脱损失} = (\gamma_m)_{\text{存在滑脱}} - (\gamma_m)_{\text{没有滑脱}}$$

如上所述, 滑脱现象同混合物在油管中的流动结构有关。应尽量减少这种附加的损失。

对于大多数自喷油井来说, 其能量是压能及气体的膨胀能, 自喷油井中的损失则是重力 (包括有效和无效的) 和摩擦损失。

我国的油田多是采用注水开发, 以保持油层压力, 使油井得以长期自喷生产。所以垂直管中多相流动的研究显得更为重要。为了更好的发挥能量的作用, 减少消耗, 应当研究多相流体在垂直管中流动的数量关系, 从而为控制自喷井的生产最优生产方式提供依据。

(三) 多相垂直管流的压降计算

多相垂直管流的损失计算方法很多, 下面介绍一种计算方法。这种研究方法是根据流体流动的能量平衡方程式, 将多相管流的能量损失用类似于单相管流的范宁公式 (或叫达西公式) 来处理, 使用了气、液两相的综合雷诺数, 并用生产液气比作为一个参变量。所用的重度是折算到井下条件的流体的平均重度。为了便于讨论, 先按单相垂直管流导出垂直管流的一般表达式, 用该表达式作基础, 再按多相垂直管流的特点, 确定有关参数, 导出多相管流的表达式。

1. 单相垂直管流一般表达式如图 (1-5) 当液体稳定流动时, 如果系统不对外做功, 也无外界对系统做功。在单相垂直管流中任取两个断面 A 和 B, 根据能量守恒定律可写成下列等式

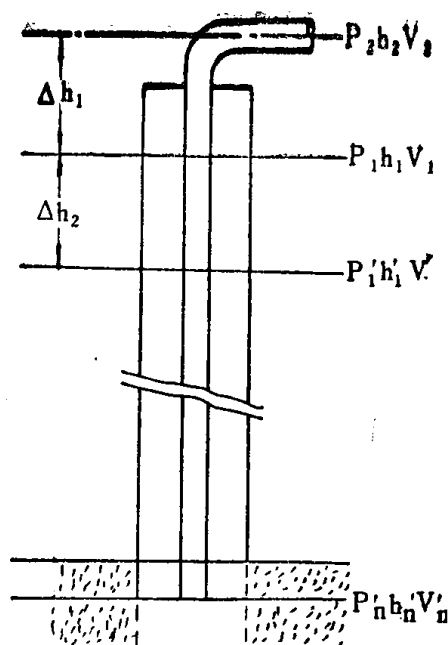


图1-5 计算油管中流压示意图

$$-\Delta h + \frac{\Delta P}{\gamma_1} - h_w = 0 \quad (1-4)$$

式中 Δh ——两个流过断面之间的深度差，米；
 ΔP ——两个流过断面之间压降，公斤/米²；
 γ_1 ——液体的重度，公斤/米³；
 h_w ——两个流过断面之间的阻力，米。

根据重度的定义得：

$$\gamma_L = \frac{W_L}{V_L} \quad (1-5)$$

式中 W_L ——液体的总重量，公斤；
 V_L ——液体的体积，米³。

根据达西公式：

$$h_w = \frac{\lambda (\Delta h) v_L^2}{2g \cdot D} \quad (1-6)$$

式中 λ ——液体垂直管流的阻力系数，无因次；
 g ——重力加速度，米/秒²；
 D ——垂直管的内径，米；
 v_L ——液体在垂直管中的流速，米/秒。

将式 (1-5) 和式 (1-6) 代入式 (1-4) 整理后，并用压降梯度 $\frac{\Delta P}{\Delta h}$ 表示，得垂直管流

一般表达式为：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta h} &= \frac{W_L}{V_L} \left(1 + \lambda \frac{V_L^2}{2g \cdot D} \right) \\ &= \gamma_L \left(1 + \lambda \frac{V_L^2}{2g \cdot D} \right) \end{aligned} \quad (1-7)$$

2. 多相垂直管流的参数确定 在式 (1-5) 中, 液体的重度 γ_L 应是混合物的平均重度 $\bar{\gamma}_m$, 总的能量损失 h_w 要按多相流的特点来处理。

自喷油井沿井筒自下而上各个流过断面处油、气、水混合物的重量流量 W 是始终不变的, 而体积流量 Q_m 和平均流速 $\bar{V}$ 逐渐增大, 所以油、气、水混合物的重度逐渐减小。但是, 油井稳定生产时, 单位时间内生产的地面 (脱气) 原油体积是不变的, 并从生产日报表中直接查到。为了找出油、气、水混合物的体积流量 Q_m 沿井筒的变化规律, 取固定值 1 米³ 地面脱气原油的体积, 作为研究混合液流的参考值, 则有:

$$Q_m = q_o \cdot V_t \quad (1-8)$$

式中 q_o —— 产油量, 米³/秒;

V_t —— 在某压力和温度下, 伴随每生产 1 米³ 地面脱气原油的油、水、气总体积, 米³/米³。即:

$$V_t = V_o + V_w + V_g$$

地面每生产 1 米³ 脱气原油, 在压力 (P) 和温度 (T) 下油应具有体积, 等于 1 米³ 脱气原油乘以该压力、温度条件下的体积系数 B_o 。 B_o 随压力 P 和温度 T 的变化关系, 可由高压物性资料得出, 见图 (1-6)。

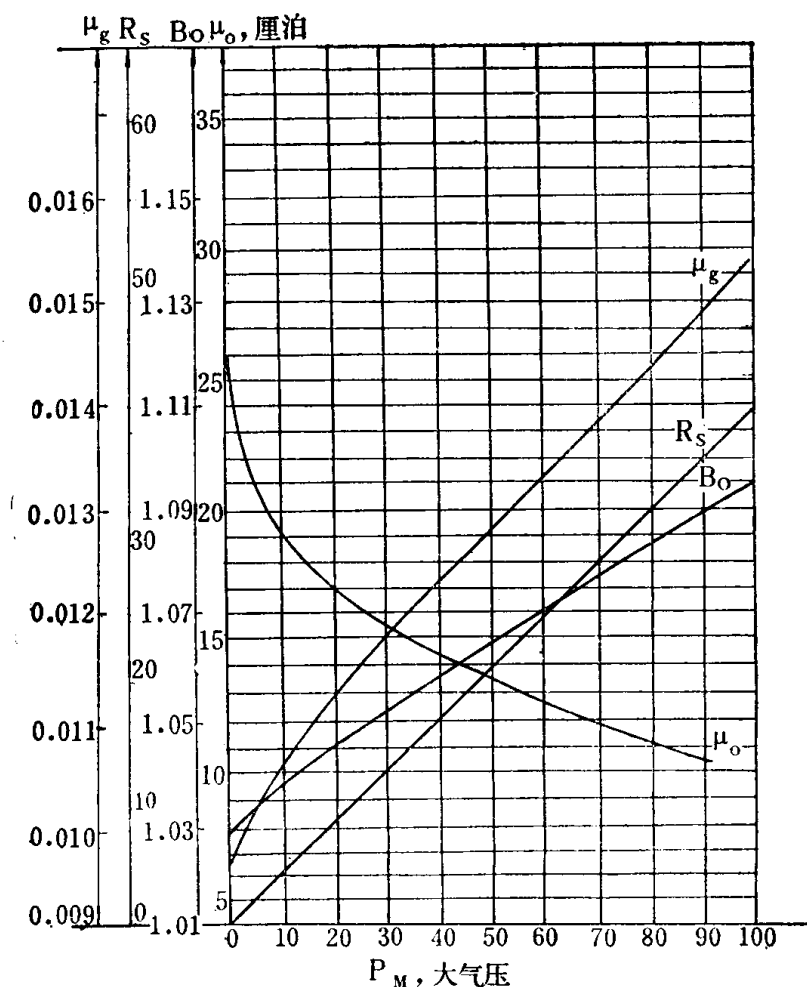


图1-6 地层油及天然气的物性综合曲线

当地面每生产 1 米³ 脱气原油时, 在压力 P 和温度 T 下, 水应具有体积。可通过生产油水比 V_w 来表示, 生产油水比等于产水量比产油量, 单位为米³/米³。由于水压缩性很小, 可以认为井筒内各流过断面处水的体积是不变的。

当地面每生产 1 米³脱气原油时, 在压力 P 和温度 T 下, 天然气应具有的体积 V_g , 可作如下分析, 并通过气体状态方程式求得。

设: R_p ——生产油气比, 等于产气量比产油量, 米³/米³;

R_s ——溶解油气比, 米³/米³。即在压力 P 和温度 T 下, 溶解在相当于 1 米³地面脱气原油中的天然气量。

所以原来在压力 P 和温度 T 时, 伴随每生产 1 米³地面脱气原油的天然气在标准状态下所占有的体积为:

$$V_{g_0} = R_p - R_s \quad (1-9)$$

但是, 还需要通过气体状态方程式将 V_g 换算到某压力 P 与温度 T 下的体积。

根据气体状态方程式, 知:

$$\frac{PV}{ZT} = \frac{FV_0}{Z_0T_0} \quad (1-10)$$

式中 P_0 ——标准压力 (绝对), 公斤/米²;

T_0 ——标准温度, 293°K;

V_{g_0} ——在标准压力和温度下的天然气的体积, 米³;

F ——压力 (绝对), 公斤/米²;

T ——温度, °K;

V ——在压力 P 和温度 T 下的天然气的体积, 米³;

Z_0, Z ——气体在标准状态与某压力、温度下的压缩因子, 无因次。

所以, 当 $Z_0 = 1$ 时, 式 (1-10) 可整理得:

$$V_g = \frac{ZP_0V_0T}{PT_0} \quad (1-11)$$

将式 (1-9) 代入上式 (1-11) 得出当地面每生产 1 米³脱气原油时, 在压力 P 和温度 T 下, 天然气 (自由气) 应具有的体积为:

$$\begin{aligned} V_g &= \frac{ZP_0T}{PT_0} \cdot V_{g_0} \\ &= \frac{ZP_0T}{PT_0} (R_p - R_s) \end{aligned} \quad (1-12)$$

综合以上的分析, 得出当地面每生产 1 米³脱气原油时, 在某压力 P 和温度 T 下, 即在某流过断面处油、气、水混合物的体积为:

$$V_t = B_0 + \frac{ZP_0T}{PT_0} (R_p - R_s) + V_w \quad (1-13)$$

当 P_1 和 P_2 相差不大时, 可以用上式 (1-13) 来计算某压力 (P_1 和 P_2) 和温度 (T_1 和 T_2) 范围内, V_t 的平均值 $\bar{V}_t$ 。只是式 (1-13) 中 P 应该采用 P_1 和 P_2 的平均值 P_{avg} , T 应该采用该温度范围的平均值 T_{avg} 。其它随压力和温度而变化的各值如 B_0 、 Z 、 R_s 等也应该采用 P_{avg} 和 T_{avg} 下的值。于是得:

$$\bar{V}_t = B_0 + \frac{ZP_0T_{avg}}{P_{avg}T_0} (R_p - R_s) + V_w \quad (1-14)$$

平均重度为:

$$\bar{\gamma} = \frac{W_t}{\bar{V}_t} \quad (1-15)$$

式中 $\bar{\gamma}$ ——在平均压力和平均温度下，油、水、气混合物的重度，公斤/米³；

W_t ——伴随每生产 1 米³地面脱气原油的油、水、气混合物的总重量，公斤/米³；

$\bar{V}_t$ ——伴随每生产 1 米³地面脱气原油在平均压力和平均温度下的油、气、水混合物的总体积，米³/米³。

于是

$$W_t = \gamma_o + \gamma_g R_p + \gamma_w V_w \quad (1-16)$$

式中 γ_o ——地面脱气原油的重度，公斤/米³；

γ_g ——天然气的重度，公斤/米³；

γ_w ——水的重度，公斤/米³；

R_p ——生产油气比，米³/米³；

R_s ——溶解油气比，米³/米³。

根据平均流速的定义：

$$\bar{V} = \frac{q_o \bar{V}_t}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (1-17)$$

式中 $\bar{V}$ ——在平均压力和温度下（即某深度范围内）油、气、水混合物平均流速，米/秒。

根据前面的讨论，沿井筒自下而上，摩擦损失逐渐增大，而滑脱损失逐渐减小。实践表明：油、气、水混合物在某深度范围内，总的能量损失 h_w 可以近似地按照达西公式进行计算，即：

$$h_w = \frac{\lambda' (-\Delta h) \bar{V}^2}{2gD} \quad (1-18)$$

式中 λ' ——油、水、气混合物垂直管流的阻力系数，无因次；

g ——重力加速度，米/秒²；

D ——垂直管的内径，米。

将式 (1-15)，(1-17) 和 (1-18) 代入式 (1-4)，整理后，得压力梯度，

$$\frac{\Delta P}{\Delta h} = \bar{\gamma} + \frac{\lambda' q_o^2 W_t^2}{12.1 D^5 \bar{\gamma}} \quad \text{公斤/米}^2/\text{米} \quad (1-19)$$

或某一压力间隔的深度差：

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\left(\bar{\gamma} + \frac{\lambda' q_o^2 W_t^2}{12.1 D^5 \bar{\gamma}} \right)} \quad \text{米} \quad (1-20)$$

3. λ' 值的确定 研究结果表明，阻力系数 λ' 是两相雷诺数 $(N_{R.})_2$ 的函数，两相雷诺数定义为：

$$(N_{R.})_2 = (N_{R.})_g \cdot (N_{R.})_l \quad (1-21)$$

式中 $(N_{R.})_g$ ——气相雷诺数；

$(N_{R.})_l$ ——液相雷诺数。

a 、 b 两常数的选取应当使两相流在任一极端情况下，即只单相流时，两相雷诺数也就随