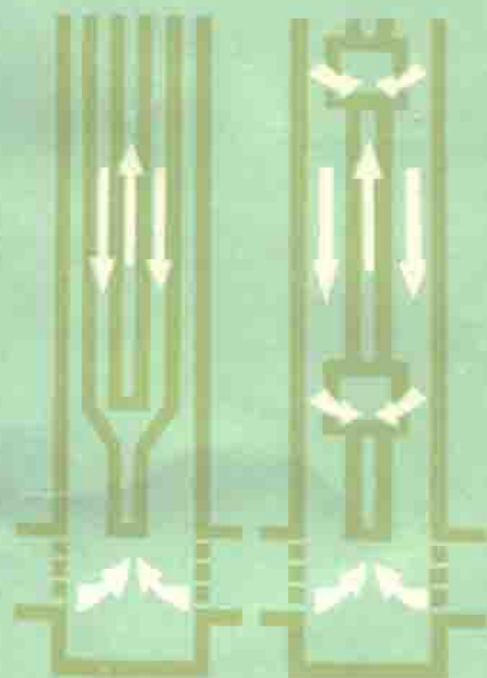


机械采油工艺

〔苏〕H.H.列平 O.M.波波夫等著



石油工业出版社

机械采油工艺

【苏】H.H.列平 O.M.尤苏波夫等著

杨代睿 译 李天伟 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书叙述了对井下装置工作的研究成果。考虑到气举、有杆泵和电动潜油泵采油过程中可能出现的复杂情况，提出了选择最优油井工作制度的建议。书中探讨了含水井生产的可能性，还论及到防止蜡和盐沉积的方法。

本书可供从事采油工艺学研究的科学和工程技术人员参考，对高等石油院校学生亦有裨益。

Н.Н.Репин О.М.Юсупов
ТЕХНОЛОГИЯ
МЕХАНИЗИРОВАННОЙ
ДОБЫЧИ НЕФТИ
«НЕДРА» МОСКВА 1976

机 械 采 油 工 艺

〔苏〕Н.Н.列平 О.М.尤苏波夫等著
杨代睿 译 李天伟 校

石油工业出版社出版
(北京安定门内外馆东后街甲36号)

轻工出版社印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 6¹/₄印张 135千字 印1-6,800

1983年 2月北京第1版 1983年 2月北京第1次印刷

书号：15037·2377 定价：0.68元

序 言

本书是作者在一些油田上对采油工艺学进行研究所取得的科研成果和经验的总结。与此同时，书中引用了国内外研究工作者涉及到采油工艺学共同性问题的资料，以及解决各油田具体油田开发特殊条件下的局部性问题的资料。

1973年，苏联机械采油量首次超过自喷采油量。机械采油井数占油井总数约85%。

就采油量而言，电动潜油泵占第一位，有杆泵次之，气举采油第三。其它机械采油法的总量所占的百分比不大。

为了叙述有逻辑性，决定依次分析各种不同的机械采油方法，而不是按其作用大小来叙述。在叙述完多相混合物的特殊性质和其运动特征之后，随即探讨气举法（气举法中这些特征表现得最明显而且对采油指标的影响最大），而后研究潜油泵和有杆泵采油的问题。

对于每一种开采方法，都提出了如何确定油井合理工作制度建议，同时还考虑到气举、有杆泵、电动潜油泵采油过程中可能出现的复杂情况。特别注意到研究地层和装置的配合问题，因为无论对有效调整油田开发过程，还是对选择装置的最优工艺措施来说，这都是基础。

书中还分别研究了非牛顿原油的油田的采油特点，以及蜡和无机盐沉积造成的各种复杂情况，因为它们对机械采油工艺有着重要的影响。

采用任何消除蜡和无机盐沉积的方法，都应根据具体油

田的技术经济条件而定。

序言和第一、第二章由H.H.列平和A.И.季亚丘克撰写，第三、第四章由H.H.列平和O.M.尤苏波夫著文，第五章由B.B.杰夫里卡莫夫论著，第六章是H.H.列平根据C.Φ.留申的研究材料编著的。

书中许多具有独特见解的研究成果，是作者与巴什基里亚石油科学研究设计院；乌发石油学院和阿克萨科夫油气开采管理局的A.H.阿瑟伽里耶夫、Ю.Г.华里申、O.Г.伽弗洛夫、Ю.С.米洛诺夫，B.A.拉古林等共同协作的结果。

目 录

序言

第一章 多相混合物在井内的运动.....	1
§ 1 多相混合物的特征.....	1
§ 2 举升过程及其物理实质	6
§ 3 多相混合物运动过程中的压力损耗类型	7
§ 4 举升效率及其提高的途径	14
第二章 气举采油.....	16
§ 1 气举工艺的类型.....	16
§ 2 气举采油法的应用范围	18
§ 3 气举井的启动	21
§ 4 气举井的试井	24
§ 5 提高气举效率的方法	28
§ 6 斜井气举的工作特点	35
第三章 有杆泵采油.....	41
§ 1 合理采用有杆泵的条件	41
§ 2 深井泵的充满系数及其计算方法.....	42
§ 3 有杆泵入口处的分离过程	45
§ 4 过饱和溶液中气体分离的实验研究气体在液体中的 可逆溶解度	52
§ 5 抽汲参数和气液混合物结构对泵效的影响	59
§ 6 溶液中气体的分离和泵筒内压力的变化	63
§ 7 深井泵抽油井的试井特征 深井仪器	64

§ 8 根据泵内和其出口所测压力进行矿场研究 动力载 荷与惯性载荷	74
§ 9 含水抽油井的开采特征 尾管的使用	78
§ 10 抽油井排水尾管的选择方法	90
§ 11 建立抽油井工作制度的方法	97
第四章 电动潜油泵采油	101
§ 1 合理使用电动潜油泵的条件	101
§ 2 气液混合物参数对潜油泵工作效率的影响	103
§ 3 抽汲多相混合物时电动潜油泵研究工作的主要方 向分析	106
§ 4 在室内条件下对叶轮工作和泵的各级的实验研究	111
§ 5 抽汲气液混合物时电动潜油泵各级协同工作的特 性	124
§ 6 实验研究结果的分析	130
§ 7 在井内研究电动潜油泵及其工作制度的确定	141
第五章 非牛顿原油油田的开采	149
§ 1 非牛顿原油的粘度异常与渗滤特征	149
§ 2 原油的触变性	156
§ 3 原油的超异常粘度	158
§ 4 原油异常粘度引起的复杂情况	162
第六章 油井生产的复杂情况	165
§ 1 蜡沉积的形成条件与机理	166
§ 2 蜡析出和沉积过程的研究	169
§ 3 消除蜡沉积的方法	173
§ 4 井内无机盐沉积的原因	176
§ 5 预防无机盐沉积的方法	179
参考文献	186

第一章 多相混合物在 井内的运动

§ 1 多相混合物的特征

多相混合物属于由不同聚合态物质组成的所谓不均质（不同质）体系。不同于此的是所谓均质体系——其各部分具有均一的物理化学性质，如象单独研究的气、油、水等。

所谓相，通常认为它是混合物的均一部分，它与其它相具有明显的边界。在矿场实践中，最通常的是由一个气相、两个液相和一个固相所组成的四相混合物（原油-天然气-水-固体微粒）。通常所有的相都是多组分的。

本书着重研究液、气三相混合物（天然气-原油-水）。两相混合物（天然气-原油，或者水-原油-水）是最简单而有代表性的物理现象。

气液混合物和其它介质一样，具有密度、粘度、压缩性、热容量、导热性等这样一些性质。同时，除了按其本质不同于均一介质外，气液混合物具有许多固有的特性参数。

混合物的含气饱和度由混合物单位体积中的气相含量来确定，用百分数或单位含量表示。

含水饱和度表示混合物单位体积中水的含量。它同含气饱和度一样，用百分数或单位含量表示。

在所研究的这种混合物中，由于存在着几个不同物理化学性质的相，这就决定了它不同于均质液体。其差别在于气液混合物的不稳定性，同时取决于体系的内能大小。

众所周知，两相的边界具有储备形成边界所消耗的能量之特性，此能量通常决定于表面张力值。相边界面积越大，则这种能量的储备自然也就越大。在气液混合物中，相边界面积是由气体包体和液体包体的总表面积构成的。既然自然界里任何体系都力求处于使其内能储备最小的状态，因此相的边界面积总是由于单个包体合并成更大的包体而随时收缩。在此情况下，只有在气液混合物被破坏时，即当气体与液体分离并占据上部位置，而液相由于其密度大而处于下部位置时，才能达到平衡。此过程一般进行得很强烈，不仅在静态下，而且在动力条件下，特别是当气液混合物是由惰性气体和均质液体所组成时更是如此。

由于气液体系的不稳定性，所以它的某些参数极难测定，而且象后面将要叙述的一样，使得对其运动过程的数学描述复杂化。

气液混合物在管道里运动时，气相和液相以一定的形式分布于流体中，形成所谓“结构”。在油矿实践中，相应于举升管，通常要研究三种结构形成的两相气液混合物，即泡沫型结构、段柱型结构和环雾型结构。这样划分是相对的，因为划分的基础是视觉标准。

对于泡沫型结构，可以解释为这样一种形式的混合物，气体以直径很小的包体形式十分均匀地分布在液体介质中。在此情况下，通常说液体是分散介质，气体是分散相。

段柱型结构是这样一种气液混合物，大部分气体是以占有举升管整个截面的气泡，并以与液柱相互交替的串珠形式运动。各气体包体的大小和相互位置可能各不相同。

在存在环雾结构的情况下，气体的主要部分是在举升管的中心连续流动，而液体既可以某种厚度按层流方式沿管

壁运动，也可以单个包体的形式在气流中运动。

对于三相气液混合物来说，结构类型更多，此时会有极不相同的运动方式。

在油水混合物中，通常要研究所谓“乳化”结构，它是其中一相以微小的液滴形式分布在另一相中的混合物。对一些具体油田和油层的油、水来说，有一定的含水饱和度，超过此值会导致相的转变，使“油包水”型乳化液转变成“水包油”型乳化液（水代替油变成分散介质）。

现在研究两相的气液混合物。在存在泡沫型结构的情况下，为了评述气相在液相中的破碎程度，引入了分散度参数^①，当鉴定某一种结构时，应指出它的分散度和气泡的直径。但是这些参数不可能说明属于不稳定体系的气液混合物的变化动力学。为此，必须引入分散作用和聚合作用这两个概念。

分散作用——气相在液相中的破碎过程。该过程仅发生于完成一定的工作、并将能量转给形成的相边界时。能量可以不同的形式表现——机械的、水动力学的、电力的、磁力的等。表现的结果之一是提高了气包体破碎得更小的程度。

聚合作用——气包体在各种因素影响下结合的过程。当气液混合物不稳定时，此作用是自发进行的。

为了表征上述各过程的流动速度，引入分散速度和聚合速度这两个参数。其物理意义非常明显，勿需补充解释。

如上所述，聚合作用与很多因素有关，其中主要是：相边界上表面张力的大小，边界的厚度、强度和弹性，气包体

① 这个参数及下述各参数同样适用于油水混合物。

大小的非均质度以及含气饱和度。单个气泡的合并机理有很多人作了足够详尽的研究(2, 53, 112)。它的本质在于在气泡相互作用的影响下, 隔开气泡的膜逐渐变薄。流体粘度越大, 则合并的时间越长, 这是由于边界厚度的减薄与从气泡接触表面压出液体的速度有关。

取决于含气饱和度的流动能力以及气包体的非均质度决定着相互作用的力。气体含得越多, 单个气泡之间的距离就越小, 它们接触的或然率就越大。当气泡密度足够大时, 其结构则具有“蜂巢”性质, 此时边界承受着很大的载荷。另一方面, 即使含气饱和度不大, 但由于气泡大小的不均匀性和由此而产生的包体飘浮速度不一样, 较大的气泡将“赶上”较小的气泡, 最后终将导致它们的合并。

前面已经指出, 随着气体边界的收缩, 体系会释放出内能。十分明显, 如果表面收缩时放出的能量足以使边界薄膜破裂, 则聚合作用将比较强烈。换句话说, 表面张力值越大, 则聚合过程进行得越强烈。参考资料(2)的研究表明, 此条件的确是必要的, 但不充分, 更重要的是相边界的强度和弹性。这些值小, 则聚合过程进行得比较强烈。根据参考资料(2)的研究, 相界面的加强并使之具有弹性可借助于向溶液中添加某些表面活性物质来实现, 这些表面活性物质吸附在相界面上的同时, 使伸长部分增加表面张力值, 而使收缩部分减小表面张力值。当不存在这样一些性能时(例如, 在化学均质液中), 气包体的合并过程则进行得比较快。

总之, 分散过程会形成高度分散的泡沫结构, 而聚合过程则会使泡沫结构遭到破坏。在油井举升管内的条件下, 随着压力的降低, 含气饱和度增加, 而相边界的性质实际上不变, 因此, 第二过程比第一过程占优势。结果, 使泡沫结构

变成段柱结构，随后又变成环雾结构。

十分清楚，上面列举的每一种结构，还可细分成很多更小的结构型式。细分决定于聚合过程的特征。譬如说根据占优势的气包体的大小、外形、气相或液相在举升管剖面中的分布程度等。与此同时，还有十分重要的参数——气相在液相中的相对速度，可作为评价结构类型的准则。它或者是阿基米德力效应的作用结果，或者是取决于附加的某一力场（例如离心力）的压力梯度的作用结果。应当指出，根据我们的研究结果〔72〕，对泡沫型结构来说，气体的相对速度上限大约等于30~40厘米/秒，对于段柱型的气泡，约为1.2米/秒，而环雾型结构，其相对速度则大于1.2米/秒。

在以后的叙述中，经常要引用两个术语——相对速度和气液混合物结构，它们是互相制约的。

为了表明气液混合物流动时结构形态的变化范围大到何等程度，看看这方面的一些研究例子即可。对巴什基里亚泥盆系自喷井的大量研究证明〔97、92〕，在这些井中，结构为泡沫型，气包体的大小多数为0.1~0.3毫米，其相对速度为1~3米/秒。在油矿实践中，常有气体相对速度达到35米/秒（环雾结构）的情况。

在三相气液混合物中，要研究气体的两种速度——相对于油的和相对于水的速度，因为油和水由于其密度不同而在举升管里的运动速度也不相同〔23、117〕。

分析上述情况可以看出，气液混合物是不稳定介质，它在举升管里运动的过程中，改变着自己的物理性质。由于分散作用和聚合作用引起结构形态的经常变化，这就只能把它们相对地分为三大类，每一类其相的相对运动速度具有一定的变化范围。

§ 2 举升过程及其物理实质

前面所研究的一些参数，其中一部分，如结构、相对速度等，仅是多相混合物独具的特征。因此，探究这些参数对混合物在管道里流动特性的影响程度，更确切地说，它们对管道里输送预定量混合物所必要的压力降的影响，则成为我们的研究课题。首先我们来研究气液混合物在管道里运动的物理实质，即气体把液体从井底举升到井口时的作用。

对此问题存在着好几种观点。例如，Г.索洛克尔和以后的B.Г.巴格达萨洛夫，他们把液体运动的原因解释为由于气体包体的活塞使用。Г.И.别罗得沃尔采夫以及H.M.格尔谢万洛夫则认为，液体之所以能在举升管里运移，是由于气体在液体中存在着相对速度。Л.维尔斯鲁依斯对其运动的实质却不认为是能量的转换，而把气体的等温膨胀过程看作是能量的来源〔72〕。

如果赞同这样一些观点，则可得出如下结论：采用其它工作介质（那怕是假设的工作介质），也不可能产生举升作用。但用简单的例子就可证明适得其反。例如，如果用容易与被举升液混合的任何液体代替气体，从而也把活塞作用、相对滑动和等温膨胀的作用排除掉，那末在一定条件下——添加液的密度较小，就可以实现举升。混合物得到举升是由于密度减小而使液柱高度增大。

这一情况（撇开其它因素则不足以使人信服），之所以被我们引用，目的在于表明减小被举升液密度对实现举升过程的作用。应当指出，气体具有较低的密度，也有助于减小被举升液的密度。

由此可见，气体的作用在于减小被举升液的密度。实际

上，如果研究一下气液混合物的泡沫结构，则根据其结构特征可以证明这个观点是十分正确的。较均质的液流可以作为介质连续性不破坏的均质液体来进行研究。但是，在环雾型结构的流动中，会出现另一种情况。对这种流型的解释通常认为是，液体既以某一厚度沿举升管管壁运动（图1中之1），又以单个包体分布在气流中，沿管子中心运动（图1中之2）。气流带着液体包体，在压差（ $\Delta P = P_1 - P_2$ ）的作用下，在举升管柱中运动。液层沿管壁运动是依赖于在气液与液层的边界上产生的切线应力。切线应力被液层的重力和液层与管壁的摩擦力所平衡。

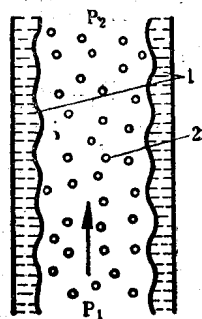


图1 环雾结构

1—附壁液层；2—气流中的液体包体

因此，在此情况下，存在着两种不同性质的运动：液层沿举升管壁的运动；气体带着悬浮于其内的液滴在举升管中心的运动。后一种流动很象反相的泡沫结构（气体为分散介质，液体为分散相）。

最后应当指出，既然运动过程的物理实质与流体的结构特征有密切关系，那末举升过程的指标也应与结构特征有关。后面的叙述证明了这个推断是正确的。

§3 多相混合物运动过程中的压力损耗类型

计算介质在举升管里的运动时，可以研究这样一种系统：管子是悬垂的，其内的介质在管鞋压力（ P_1 ）与井口压力（ P_2 ）之间的压差的作用下运动，介质密度按照一定规律

变化。同时,根据类似于液滴的管内流体力学定律可以认为,混合物在悬垂管内运动时,应产生两种压力耗损:一种是补偿混气液柱重量的压力耗损(P_{CM}),另一种是摩擦耗损(P_{Tp})。同时,由于气体膨胀,混气液的速度增大,从而形成附加的压力耗损,叫做惯性耗损(P_{IH})。此外,各种局部阻力(管子接头、井口装置等)也引起附加的能量损失(P_M)。

这样,可以写出一个通常用来描述多相混合物运动的等式:

$$P_1 - P_2 = P_{CM} + P_{Tp} + P_{IH} + P_M \quad (1)$$

通常,这个函数关系是计算多相举升的依据。

据目前知悉有 А.П. 克雷洛夫、В. П. 巴格达萨洛夫、И.Т. 格拉德科夫、В.А. 阿尔汉盖里斯基、С.Г. 切列托夫、П.П. 阿尔古诺夫、А.Ф. 卡西莫夫、Г.С. 鲁托什金、Ф. 波埃特曼、П. 卡尔品切尔、К. 霍维尔斯等人的计算方法。他们最后都以不同的精确度提出了决定式(1)中各项参数的数学关系。

但是要建立一种通用的计算方法未必可能。此论题将在下面论证。现在,为了简化叙述,我们来研究在管内运动的是泡沫结构,且没有相滑动和摩擦等的压力耗损的举升管的计算关系式。

已知气体流量为 V_0 , 液体流量为 $\bar{q}$, 若气体重量略去不计,并假定气体为等温膨胀过程,则举升管内任何一点的密度 ρ_{CM} 可以用下式表示:

$$\rho_{CM} = \frac{q\rho}{q + \frac{V_0 P_0}{P}} = \frac{\rho}{1 + R} \quad (2)$$

式中 V_0 ——折算到大气压力 P_0 下的气体体积流量;

P ——举升管内任何一点上的压力；

R ——在所研究的条件下气体单位流量；

ρ ——液体密度。

ρ_{CM} 的值也可用下式表示：

$$\frac{dp}{dh} = g\rho_{CM} = \frac{q\rho g}{q + \frac{V_0 P_0}{P}} \quad (3)$$

式中 h ——座标。

移项并积分后，则得

$$h\rho q = P + \frac{P_0 V_0}{q} \ln P + C \quad (4)$$

给定边界条件，则有

$$P_1 - P = H\rho q - \frac{P_0 V_0}{q} \ln \frac{P_1}{P} \quad (5)$$

式中 P ——流动压力。

关系式 (5) 是 A. П. 克雷洛夫首先推导出来的，它表示了压力降与举升参数 ρ 、 q 、 V_0 、 H 的相互关系。

现在我们将课题考虑复杂些。假定气相和液相具有不同的速度。这意味着每种组分的体积流量相同时，每个运动相所占据的举升管截面积将是不相同的。在这种情况下，具有高速度的组分将相应占据管子的小部分面积。下面我们引入一些补充符号： f ——举升管截面积； f_r 、 $f_{ж}$ ——分别为气相和液相所占据的举升管部分的截面积； C_r 、 $C_{ж}$ ——分别为气相和液相的绝对速度； C_s ——气体在液体中的相对速度[●]。

考虑到上述情况，可以列出下列等式：

● 在引用的术语中，意指平均值 [72]。

$$V = C_r f_r \quad (6)$$

$$q = C_{\pi} f_{\pi} \quad (7)$$

$$f = f_r + f_{\pi} \quad (8)$$

$$C_s = C_r - C_{\pi} \quad (9)$$

$$\frac{\rho_{CM}}{\rho} = \frac{f_{\pi}}{f} \quad (10)$$

解等式(6)~(10)可得

$$\frac{\rho_{CM}}{\rho} = \frac{f C_s - q - V + \sqrt{(f C_s - q - V)^2 + 4 f C_s q}}{2 f C_s} \quad (11)$$

利用关系式(11)，可以分析相对速度对举升过程特性的影响。此式表明，这个影响是极大的；液体产量越小，且单位气体流量越大，则影响越严重。若气体在液体中没有相对速度，则可观察到最小密度。十分明显，这种情况在自然界是不可能存在的。但是如前所述，在油矿实践中，气体相对速度非常之小的情况却十分普遍。

关系式(11)对于单元长度的举升管来说是正确的。假定 $C_s = \text{常数}$ ，则压力降与其它参数 (q 、 V 、 ρ 、 C_s) 的关系可以很容易地求得。

同时应当指出，气体在液体中的相对速度变化范围很大。这种变化既可能在混合物结构变化时发生在举升管的任何截面上，也可能发生在举升管的任何长度上。由于关系式(11)是在气体相对速度为常数的情况下得到的，因此，在实际条件下运用此式是不合理的。

现在我们来研究单一气泡的飘浮。气泡飘浮速度是一个不少于12个自变数的函数，这些函数的不同组合，可能使气体的相对速度有不可思议的大量的具体数值。自然，气液混