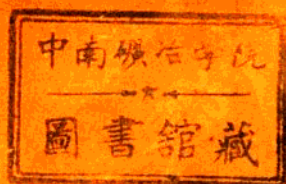


228822

油、气田开发译文集

井距问题



3

中国工业出版社

油、气田开发译文集

3

井距问题

中国工业出版社

目 录

井距問題簡論.....	S. 洛吉岡(1)
井网密度对采收率影响的經濟評價.....	Л. П. 古日諾夫斯基(53)
杜瑪茲地区 M_1 层的原油損失与井网密度的 关系.....	A. П. 克雷洛夫等(59)
油井見水前面积注水过程某些指标的近似計算 公式.....	Ю. П. 包利索夫(67)
薩馬拉路卡油田原油采收率的矿場研究.....	A. Л. 卡比西尼柯夫(81)

井距問題簡論

S. 洛吉岡

摘要 本文內容有三部分：第一部分介紹井距和采收率的关系，包括最佳井距的确定、井距与采收率的关系、气藏的井距和不同类型油藏的井距、生产井的相互干扰；第二部分介紹油田的井距及其生产期，包括确定可采儲量、开发速度、生产期的計算及举例；第三部分介紹井网及其应用，包括井网的几何形状、井网变形及合理布井、带状油藏的井网、多层油藏的井网，等等。

一、井距和采收率

1. 引言

不論在西德，还是在世界上其他国家，凡是老油田，都有过井架星罗密布的景象。可是，人們只要稍稍观察一下現时的油田，就会发现，油井的井距已經比过去大得多了。

远在二十年代，一般认为，在一个油田內，所钻的井越多，則采油量也会越多。“井越多，油越多”，这在当时是一种公认的说法。因而，最受人們注意的，是钻井工作的成就，而不是开发設計的改善和合理的开采方法的提出。究其原因，是由于缺乏对比的可能。也就是說，沒有一个油田能有机会采用不同井网和井距进行两次开采，以便对比各次結果。因而，几乎就不可能通过确凿的实际数据来証明，采用最佳的大井距真会增加盈利。

只在三十二年以前，在美国的专业文献中，才初次指出这个問題的重要性。最先研究井距問題，并作出多余井警告的人，是1923年在德克薩斯工作的科隆(M. Collon)[8]。他认为，如

果先前钻成的油井已经足以采出原油的可采储量，那么，后钻成的每一口油井都是多余的，因而也是没有任何必要的。考特列尔 (Cutler) [12] 在 1924 年发表了他那有统计资料为根据的面积定则 (Flächengesetz)，长时间内曾经是计算井距的唯一方法。

正如美国石油学会在 1937 年任命的法律委员会所指出的 [2]，美国的旧法规仍在间接支持密井距的采用。例如，人们总是依据美国在 1923 年通过的“石油保护法”，来限制油田中滥肆开采国家矿藏的做法。那就是：硬性规定每口油井不得超过的最高产量。而这种生产限额是按照油层厚度，不是按照采用的井距大小来规定的。这样，在一个油田中，如果要获得更高的日采油速度，就必须增加井数，因而，井距便随之缩小。这种情况，再加上出于竞争观点而在各自租地的边界上多打井的做法，就成了美国多余井越发加多的又一根源。

1935 年，肖 (Shaw) [49] 曾指出，当时俄克拉荷马州累计打成了 1,128 口多余井，总损失达二亿五千万美元。而到目前为止，美国全国此数究有多大，简直难以估计。

契尼 (Cheney) [8] 指出，美国可开采的油藏尽管油层浅、原油的市价高，获利还是甚少，甚至没有盈利。出现这种情况，多余井过多是一个主要原因。而 1935 年以后，由于日益采用较大的、比较合理的井距，开发价值不大的油田时，尽管油层深、油价较低，也还是完全有利可图。

最佳井距

对所有在这方面起作用的因素，以及它们对于所选井距的影响，我们均将从地质、技术、经济的相互关系着眼加以考察。

通过采取某种“最佳”的井距，就可以获得最大可能的、最大限度的成果。

这里有两种观点：

1) 当储油层中的原油能在现代采油方法达到的限度内被采完时，才有所谓地质和物理成果。

2)能保証达到最大可能的盈利时,才有所謂經濟成果。

在某种範圍內,可以认为,对于均匀的油层,单位面积內的采收率是与所钻井数无关的。这种情形,既有事实为証,而且也能部分地在理論上加以証明^①。因而,在这种情况下,經濟的或者财务的观点便具有决定性的意义。在这方面,对每一特定油田而言,都要有两种互相独立的观点:

1)能保証从某一产油面积內获得最大盈利的最佳井数^②;

2)最有利的井距及最合理的布井。这样,才能在保持上述最佳井数并参照当地具体条件和企业要求的情况下,保証油田达到最高的采收率。

某一特定油田面积內的最佳井数为常数时,井点之間的距离也应参照具体条件而有所区别。

在探討最佳井数时,主要是进行經濟上的考虑。然而,合理的布井却是一个綜合考虑地质—构造—油田动态等关系以及企业生产条件与当地具体条件的問題;即使在同一个油田內,也会互有差异^③。

考特列尔的面积定則

考特列尔〔12〕根据大量的統計資料,在1921年断定,一口井的平均总采油量是与它所控制的排油面积直接有关,也就是說,是与排油面积的平方根成反比。在油藏参数为常数时,如井距加大一倍,总采油量便会减少一半,即:

$$\Sigma q = \frac{C}{\sqrt{F_0}} = \frac{C}{\sqrt{f(a)}} \quad (1-1)$$

式中 Σq ——一口井的总采油量;

① 姑且认为此問題上的爭論业已結束。下面我們还要詳細討論这点。

② 一定生产面积內(例如,100公頃)的井数(N),用以表示“钻井密度”。井数的倒数乘上生产面积(以公頃为单位),即是单井排油面积(以公頃为单位)。

③ 这里要指出的是,在油层被断层破坏,各部分均成独立单元时,每一单元均需单独加以考察。每一单元应至少用一口油井采出所含原油,因为要靠采出的石油的利潤来补偿所耗的費用。

F_0 ——該井所控制的排油面积，它是井距的函数 $f(a)$ ；

a ——井距；

$f(a)$ ——井距的几何函数(Ⅱ級)。

如两口油井(1)、(2)与第三口油井(3)的距离均不等，則单井的总产量将如下式所示：

$$\frac{\Sigma q_1}{\Sigma q_2} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \frac{a_{2,3}}{a_{1,3}} \quad (1-2)$$

上述两个方程式均以考特列尔公式聞名，在它提出以后的15年中間，是唯一可以采用的求井距方法。考特列尔想用这些公式証明，按密井距打的井，能比大井距获得更高的采收率。而賈敏效应的概念又表明，如石油与气泡在一狹窄的管中混合，則从管中驅出石油，要比无气泡时所需能量更大(詳見凱尔洪[7]及維尔紐斯[57])。因而，人們就产生了一种印象，认为在儲层孔隙中存在着与气泡混合的石油时，要使石油发生前进式运动，是需要大量能量的。一些专业文献又曾引用过若干油田的剖面图，来表明大部分未采完油的空間是殘留在各生产井之間。这样，大家都相信，石油向井底的水平运动需要大量的能量，因此，油田的井距如再加大，采收率就不会使人滿意。其实，就連考特列尔本人，当时也曾怀疑过自己的統計发现，并且明确地表示过不能把他的公式普遍化；可是，这个公式以及关于賈敏效应的概念，还是被用来証明上面說过的“井多油就多”那句行話是对的。

后来，提出了与上述相反的意见：

- 1) 考特列尔考察的是单井产量，而不是油田的总采收率；
- 2) 他的全部观察都只涉及到1921年以前投产的老油田，而这些油田根本没有采取任何合理开采和保持油田能量的措施；
- 3) 按照他的公式，油田中的流体运动时，所需能量与所經距离是成正比；但这种现象仅为水平(平行)流动所特有，而非辐射状流动所特有。后来(1930年)，赫尔和古斯里[21]曾引用过德克薩斯州油田的大量統計例証，來說明考特列尔的公式在这些油田上是不适用的。

图林逊(Tomlinson)理論

图林逊是美国最知名的地质学家，他是密井距的鼓吹者。从二十年代起，图林逊就在南俄克拉荷馬州的油田上工作。該处一些儲量甚丰的大油田，生产层均为宾夕凡尼亚紀阿尔特(Alter)浅层砂岩。他指出[51、52、53]，为要經濟地开采出这些老油田中即将失去的石油儲量，将来必須补打一批中間井。他还认为，所有这类油田的开采数据，都証明考特列尔公式是正确的。和美国許多別的地質家一样，图林逊虽然没有能从物理学上加以論証，但他还是肯定，对任何一个油田都能求出能保証它获得最高采收率的临界井数。如果采用大井距，油田中就会有出現死油区的危險。而就美国所有油田來說，这就是一笔相当可觀的采不出的石油量，因而也就是意味着国民經济一笔为数甚巨的损失。俄克拉荷馬和加里福尼亚油田中的一些統計資料和直接觀察材料，也确实証明了图林逊所發揮的理論。

临界井数，要作为采油曲綫与經濟收益曲綫的一个交会点来探求。虽然，采用大井距时，单井产量会有增加，而按照图林逊的看法，单位面积上的总采收率却会减少，也就是与井距成反比。

图林逊的觀點，是以他对于采油过程中能量作用的錯誤理解為根据的。他的出发点是：采用大井距时，石油在油层中的运动需要大量的能量；到后期，如要进一步采出油田中的石油，就必须人为地补充能量。图林逊认为，有大量的統計資料可以作为这个看法的“毋庸爭辯”的証据。可是，“临界井数”这个理論和下述論断是矛盾的，这个論断就是：石油采收率与井距没有关系；因而，工程界以及所有的油田物理学家都坚决地否定图氏理論。美国著名的石油地質家貝尔屈姆(3)也不同意图林逊的看法。

凱維列尔(28)曾說过，“井本身并不产油”，它只不过是人們借以利用油藏能量的一种工具，用来从油层中采出石油并将石油从地下采至地面。所以，油井和生产过程中的工具一样，不在量之多少，只要使用得当，量少也能生产同样的，甚至更多的产

品，即比量多而使用不当的工具生产的产品更多〔33〕。

2. 采收率

任何油田的开发，都有一个不言而喻的直接目的，那就是：尽可能多地采出油层中的石油。从根本上說，影响采收率大小的因素有如下几点：

1) 油层(含有油、气、水)中的能量储备以及使之成为有效能量(即积极驅动力)的油、气、水相互关系；

2) 可采流体在流动时所消耗或轉化的反作用力，它会或大或小地减低采油速度和使之发生困难(此种阻力的大小决定于油层以及流动介质的特性)；

3) 合理开采，亦即为着采油的目的而使油层能量变为有效能量的方式和方法(从物理学观点看，如在采油时耗费的油层能量最低，即算为合理的开采〔34〕)；

4) 此外，总采油量还要取决于技术輔助措施的規模(如压裂、酸化等增产措施，以及所采用的二次采油法效果〔48〕)。

临界井数这个概念与采收率之間的相互关系，能不能从理論上一般地加以証实呢？从二十年代开始，一切的努力都是为了証明相反的关系(图林逊及其贊同者直到今天还在很坚决地辯护自己的观点)。

摩尔和維尔德〔40〕还在1932年就企图闡明采收率和井距之間的物理关系。为了从数学上闡明含油层中的流动过程，他們采用了普阿泽依里(Poiseuille)和范宁(Fanning)的方程式。他們发现，如井距对于采收率的影响因采油速度的递减而变得极其微小时，則未发生递减时的总采收率和井距之間是有某种对数关系的①。

① 从普阿泽依里和范宁方程式中可得：

$$\frac{16\mu}{d} \cdot \frac{\partial r}{\partial x} = \rho \cdot \gamma \left(\frac{\partial r}{\partial x} \right)^2, \quad (1-3)$$

式中 μ ——粘度； d ——毛细管的 ϕ ； γ ——油藏流体比重； ρ ——摩擦常数； r ——距离； x ——时间。

将此式变更以及导入油藏的有关常数后，即得：

$$\frac{P_1 - P_2}{P_a} = \frac{q_o}{\pi \cdot H \cdot \mu \cdot K} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (1-4)$$

式中 P_a ——常压； P_1 ——靜压力； P_2 ——井內流压； q_o ——无递减时的采油量； H ——含油层厚度； K ——含油层渗透率； r_1 ——排油半徑； r_2 ——油井半徑。

米勒和希金[38]在1939年曾用达西定律証明，使1米³的石油在24小时内成辐射状流过600米距离所必需的能量，仅比相同条件下流过200米的距离所必需的能量多10%。而且，只要是地质上和能量上均为统一体的油藏，其井数以及井的密度对于采收率都毫无影响！这个論断，除去图林逊以外，所有的专家学者都认为是正确的，它就是进一步闡述最佳井距問題的立足点。从理論上說，一口合理布置的井的采油效果是能够和用更多的井一样的（參見烏侖[55]、阿尔貝特[1]以及梅耶尔-古尔[36]）。

从另一方面來說，沒有井，是根本生产不出石油的。实际上，每个油田在其固有的条件下，总会有与其可能达到的采收率相当的某种最低井数。所以，在井数增加时，采油量自然不会随之增加，因为在此情况下，油田的采收率是不会提高的。从这个观点来看，井距問題是一个边际值的問題(Randwertproblem)；而解决这个問題，就須求出此种最低井数亦即最低的投资額。按照我們的定义，探求某一油藏面积所必需的井数，乃是为了获得最大限度的盈利。这就不再是边际值的問題，而是寻求某种以分析方式或图解方式所証明的函数的最大值^①（最高值）。

3. 气藏和凝析气藏

从純粹推論的角度來說，气藏的采收率，似乎与油藏不同，即比油藏有利得多。因而，人們就会考虑，用一口钻在构造高点上的井来采气还是用許多井来采气；前一种方法要慢一些，后一种則快些，但两者的采气效果从数量上来说却是相同的。

从物理观点看，这里要指出以下各点：

1) 儲层內的气流虽然是粘性的，但是它遇到的流动阻力相当小，因此，气体的流速会比石油的流速大得多。

2) 气体遵循的是波义耳-馬里奥特定律，偏差程度很小。

^① 下面我們要指出，尽管这种关系是能够証明的，但是还是不能用純粹的代数函数表达出来。

3)采气时产生的压力降会造成局部的温度降。另一方面,因气体流速升高引起的摩擦作用又会产生热量。因此,可以认为,气流在热动力方面是稳定的或等热的〔23〕。

4)如保持调节时,所有井均可长期稳产。在采气速度稳定时,有些气藏可采出原始可采储量的60%^①。

5)采气速度可与气藏投入开采的体积成正比。

气藏的流动过程,虽然是简单的,容易想象的,但是,用数学式来表达,仍有一定困难。根据拉普拉斯位能理论,整个流动过程可用两个偏差分方程式表达如下:

$$\nabla^2 \gamma = \alpha \frac{\partial \gamma}{\partial z} \quad (1-5)$$

$$\nabla^2 p = \alpha \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1-6)$$

式中 γ ——气体比重(公斤/厘米³);

p ——压力(单位同上);

z ——时间;

∇ ——微分算符^②;

α ——气藏单位常数。

赫尔斯特〔22〕,麦斯盖特〔44〕等人从方程式(1-5)和(1-6)中导出了多孔岩石中辐射状气流的一般方程式^③:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{2\phi\mu}{K} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1-8)$$

① 特别是强烈的水驱气藏,从水力学观点来说,气流过程至少在一段时间内可以认为是稳定的。

② 这是哈密尔顿在向量分析中创用的算符,作为三座标轴分量的符号向量,即:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial u} + j \frac{\partial}{\partial v} + k \frac{\partial}{\partial w} \quad (1-7)$$

公式(1-7)右方可作为带无向量 φ 的向量之积,因而 $\nabla\varphi$ 可书写在梯度 φ 的位置上。符号书写的用法参见杜谢克〔13〕及瓦格纳〔58〕。

③ 详尽地讨论这一导出式不属本书范围。方程式(1-5)和(1-6)是以连续性为其先决条件的。因而,它仅适用于能量系统为统一单元的气藏。详见布雷斯〔6〕及考尔涅尔〔10〕文献。

式中 r ——井作用半徑；
 ϕ ——孔隙率；
 μ ——气田条件下气体粘度；
 K ——气体有效渗透率。

由上可見，井距和井的“空間分布”，对于因子 r 是有影响的。但是，除非减去 z 这个時間基本变数，在 r 和 p 之間是不会有数学上的单方面关系的。方程式 (1-6) 表明， p 只取决于基本变数 z ，而无需导入 r 这个空間因素。方程式 (1-8) 的解析，在数学上有一定困难。虽然，相反的是，方程式 (1-8) 的函数关系在分析上是很清楚的。因而，从物理学上說，总采收率不取决于井数，而是取决于時間，也就是說，总采收率实际上是取决于經濟的因素。井数过少时，由于經濟的原因，单井的产量就不得不过大；而这种情况反过来又会引起其他困难，例如出砂多、产水多、設備磨損增加等等。当然，这些情况是絕不会危害到总采收率的^①。

斯密斯[51]在15年以前就曾进行过詳細的計算。他証明，在气藏中，如井距是在連續性这个先决条件范围内选定的，总采收率就不会受到影响；同时，按照产层的厚度大小，每口生产井最經濟的排气面积为 40~100 公頃。

原則上，这个設想也适用于凝析气藏，但其动态至少需与气藏的地下冷凝液相似。当然，这只在采用循环法时才适用。否則，气藏压力就会随产量的增加而下降。而一达到凝析压力，气层內就会产生选择性的分异作用^②。在这种条件下，凝析气藏的动态就和油藏相似（气从油中析出，油气比增高，因而采收率便会降低）。但就是在这种情况下，采收率也不会受到井距的影响^③。

① 对于地下水活跃的气藏來說，水錐的形成也会有一定的作用，这种作用，可用边际条件的形式表达[43]。

② 就西德的情况而言，研究凝析气藏暂时还没有实际的意义。

③ 詳見麦斯蓋特[43]和琼斯[27]。

4. 油 藏

上面已經說过，采收率与井距没有关系。在以下几节中，我們就来証明这一点，并从各种不同类型的油藏来作更詳尽的探討。

有气頂，但无水驅动的油藏

在这种油藏中，液体的膨脹和气頂的扩展提供了采油所必需的能量。只要油藏一开始采油，气体便会立刻从饱和的油中逸出。因而，油井必須控制，以便最充分地利用油层的能量；这就会使油田的压力緩慢地下降，从而对最終采收率发生影响。

麦斯盖特〔42、43〕和皮尔逊〔46〕曾經証明，从理論上說，井数对于总采收率可能产生的影响是极小的，簡直可以略而不計。关于这一点，本书以下还要讲到。

如果我們專門考察油藏中某一单位体积单元(該单元等于1)，假定其含水饱和度为 σ_w 。又設 P_o = 原始油层压力(单位：大气压)， β_o = 地层体积系数(原始的)， S_o 为油藏条件下的气体可溶性(天然的油气比)。經過某一段時間后，油层压力下降至 P ，因而气体可溶性变为 S ，地层体积系数变为 β 。采油时，伴生的总产气量将为：

$$A = \frac{1 - \sigma_w}{\beta_o} S_o - (1 - \sigma_o - \sigma_w) \frac{1}{\alpha} - \frac{\sigma_o}{\beta} S \quad (1-9)$$

式中 α —— 油层条件下气体压缩性； σ_o —— 同一条件下的含油饱和度。

上述体积单元在每一特定時間內同时产出的石油和天然气即具下值：

$$\text{石 油:} \quad dQ_o = d\left(\frac{\sigma_o}{\beta}\right) \quad (1-10)$$

$$\text{天 然 气:} \quad dQ_g = d\left[\frac{\sigma_o}{\beta} S + (1 - \sigma_w - \sigma_o) \frac{1}{\alpha}\right] \quad (1-11)$$

假定采油面积为一环形，其内直径为 $2r_w$ (井半径)，外直径为 $2r_e$ 。

如果再假设此环形面积内压力分布是均匀的，而且含油 (σ_o)、含气 (σ_g) 和含水 (σ_w) 饱和度在很短的一段时间内是稳定的。则由于相的流动关系，并不是所有的分离出来的天然气都和油同时产出。而产气时，也不是所有的石油都能产出，产出的只是一部分石油，即 Q'_o ，其值如下：

$$Q'_o = \frac{1}{\beta \cdot b} \cdot \frac{Q_g}{\int_0^z Q_g \cdot dz} = \frac{1}{\beta \cdot b} \cdot \frac{Q_g}{A'} \quad (1-12)$$

式中 Q_g ——瞬时分离的气量(产气量)；

A' ——在该体积单元中流动的总气量；

b ——决定气体有效渗透率的系数。

在方程式(1-9)的 A 与 A' 之间存在着如下几何关系：

$$2\pi r A' = \pi(r_e^2 - r^2) A \quad (1-13)$$

式中 r 为上述体积单元中半径距离(在油井中央测出的)。

从公式(1-13)导出：

$$A' = A \frac{r_e^2 - r^2}{2r} \quad (1-14)$$

再导入一个可变数 r ，进一步展开就很困难了。可用平均的中间值 A'_m 作为 r_e 和 r_w 之间的面积积分来代替 A' 。据式(1-14)可得：

$$A'_m = A \frac{\int_{r_w}^{r_e} \frac{r_e^2 - r^2}{2r} \cdot dr}{r_e - r_w} = \frac{A}{2} \cdot \frac{r_e^2 \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{r_e^2 - r_w^2}{2}}{r_e - r_w} \quad (1-15)$$

实际上， r_e 比 r_w 要大得多；因而 r_w 可以略而不计。因此，式(1-14)可简化如下：

$$A'_m = A \frac{r_e}{2} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right) = A \cdot E \quad (1-16)$$

式中 $E = \frac{r_e}{2} \cdot \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right)$, 可以作为井距的函数。

这里没有假定有边水存在, 所以, 该条件下采油过程的“物质平衡方程式”^① 可以写成下式:

$$\begin{aligned}
 S + \beta \frac{\mu_o}{\mu_g} \cdot \frac{K_g}{K_o} \cdot \frac{1}{\alpha} &= \frac{Q_g}{Q_o + \frac{1}{\beta \cdot b} \cdot \frac{Q_g}{A'_m}} \\
 &= \frac{Q_g}{Q_o + \frac{1}{\beta \cdot b} \cdot \frac{Q_g}{A \cdot \frac{r_e}{2} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right)}} \quad (1-17)
 \end{aligned}$$

在上述方程式中代入 Q_o 和 Q_g 值, 即得:

$$\begin{aligned}
 S + \frac{\beta \cdot \mu_o \cdot K_g}{\mu_g \cdot K_o \cdot \alpha} &= \frac{d \left[\frac{S \cdot \sigma_o}{\beta} + (1 - \sigma_o - \sigma_w) \frac{1}{\alpha} \right]}{d \left[\frac{S \cdot \sigma_o}{\beta} + (1 - \sigma_o - \sigma_w) \frac{1}{\alpha} \right]} \quad (1-18) \\
 d \left(\frac{\sigma_o}{\beta} \right) + \frac{1}{\beta \cdot b} \left[\frac{1 - \sigma_w}{\beta} S_o - (1 - \sigma_o - \sigma_w) \frac{1}{\alpha} - \frac{\sigma_o \cdot S}{\beta} \right] \frac{r_e}{2} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right)
 \end{aligned}$$

在导入偏微分并以 R 表示油气比后, 含油饱和度因压力系数的变化而产生的系数变化即如下式:

$$\frac{d\sigma_o}{dp} = \frac{\xi}{\zeta} \quad (1-19)$$

式中

$$\begin{aligned}
 \xi &= \frac{\sigma_o}{\beta} \left(1 - \frac{R}{\beta \cdot A \cdot E} \right) \frac{ds}{dp} + (1 - \sigma_o - \sigma_w) \left(1 - \frac{R}{\beta \cdot A \cdot E} \right) \frac{d \left(\frac{1}{\alpha} \right)}{dp} \\
 &\quad + \sigma_o \left[R \left(1 + \frac{S}{b \cdot A \cdot E \cdot \beta} \right) - S \right] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (1-20)
 \end{aligned}$$

① “物质平衡”方程式最早是希尔苏斯提出的(见麦斯盖特^[43]和琼斯^[27])。英文“物质平衡”(Material-Balance)一词确切的德文译法应是物料协调(Stoff-Ausgleich)或“物质平衡”(Material-Bilanz), 但在专业文献中未获流傳。

$$\zeta = \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\mu_o}{\mu_g} \cdot \frac{K_g}{K_o} \right) + \frac{R}{b \cdot A \cdot E \cdot \beta} \left(\frac{S}{\beta} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (1-21)$$

方程式(1-19)仅能进行数值积分。

按麦斯盖特的說法, $E = \frac{r_e}{2} \cdot \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right)$ 这个系数 (Faktor) 是表示溶解气的作用。在 $r_w = 80$ 毫米时, 如井距变化, E 值也将变化, 例如:

$a = 400$ 米时, $E = 160000$ 毫米;

$a = 200$ 米时, $E = 73600$ 毫米。

只要假设油藏体积等于 1 米^3 , 上述数字始终有效。对正常大小的油藏而言, E 的数值会是很大的。由于各项均有 E 作为除数, 因而其数值很小, 简直可以局部地略而不计。从方程式(1-19), (1-20)及(1-21)中进一步导出:

$$\frac{d\sigma_o}{dp} = \frac{\frac{\sigma_o}{\beta} \cdot \frac{dS}{dp} + (1 - \sigma_w - \sigma_o) \frac{d\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{dp} + \frac{\sigma_o}{\beta_2} \left[-S + R \left(1 + \frac{S}{b \cdot A \cdot E \cdot \beta} \right) \right] \frac{d\beta}{dp}}{\frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{\mu_o}{\mu_g} \cdot \frac{K_g}{K_o} \right)} \quad (1-22)$$

表 1 凱勒和卡洛威两人計算的不同井距下的理論总采收率

渗透率 千分达西	采油面积 公顷/井	最終采收率 %
15	6.4	16.25
15	3.2	16.47
15	1.6	16.45
15	0.8	16.60
15	0.4	16.90
15	0.1	16.48
300	16.0	19.87
300	8.0	20.01
300	4.0	20.02
300	2.0	19.93
300	1.0	20.01

这样，就证明了采收率与空间这个因素是没有关系的。

凯勒和卡洛威[30]曾用另一种方法进行计算，求得了渗透率为15及300千分达西的油层在不同井距下的理论总采收率。他们假定最终采油速度为0.1米³/日，计算结果如表1所示。

最终采收率差异很小，简直可以无需考虑。正如上表证明的那样，采收率一般是和井数没有关系的。

无气顶、无水驱的油藏

这种油藏一般未为气饱和。初期采油能量仅仅来源于液体膨胀作用。油层压力在开采后很快下降，达到饱和压力后，油层的变化就将如前所述。在这种情况下，总采收率也不受井距的影响。

· 麦斯盖特[43]曾举加里福尼亚州的杜明归兹 (Dominguez) 油田为例。在这个油田上，油层能量是溶解气和重力驱动。它的原始油层压力达210大气压，油与溶解气之比为112标准米³/米³。而采用不同井距时，总采收率也几乎是不变的。由表2可见，总采收率仅仅受到封存水 (Haftwasser)、渗透率以及油层厚度的明显影响。

表2 不同井距下理论总采收率

(据麦斯盖特)

采油面积	油层厚度	平均渗透率	封存水	计算的总采收率
公顷/井	米	千分达西	%	%
0.183	30	10	45	40.6
0.740	30	10	45	40.4
2.950	30	10	45	40.2
11.40	30	10	45	40.0
11.40	3	10	45	32.8
11.40	30	57	30	37.5
11.40	3	57	30	36.8
11.40	30	500	20	32.9
11.40	3	500	20	32.8