

〔羅馬尼亞〕 N·克瑞斯特 著

地下水力学

刘惻宁 叶詩美 王謙身 譯

下 册

中国工业出版社

地 下 水 力 学

下 册

〔罗马尼亚〕 N·克瑞斯特 著

刘懋宁 叶诗美 王谦身 译

中国工业出版社

本书系统而全面地阐述了多孔介质内非均质液体的流动原理。介绍了各种含气非均质液体的流动规律、油田开发过程中油井的干扰、确定油井产量和注入量的方法，以及多相液体渗流与井距及开采方式的关系等。

本书可供石油矿场工程技术及地质工作人员参考。对有关各石油院校师生也有参考价值。

Dr. Ing. N. Cristea
HIDRAULICA SUBTERANA
VOL. II
EDITURA TEHNICA
Bucuresti, 1958

* * *

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРАВЛИКА
ТОМ II

Перевод с румынского инж. Бан Акош
Под редакцией д-ра физ.-мат. наук В. П. Пилатовского
ГОСГОПТЕХИЗДАТ, Москва, 1962
根据苏联国立石油燃料科技书籍出版社
1962年版翻译

* * *

地 下 水 力 学
下 册

刘懋宁 叶诗美 王谦身 译

•

石油工业部编辑室编辑（北京北部六部坑石油工业部）
中国工业出版社出版（北京佳明路丙10号）
北京市书刊出版业营业许可证出字第110号
北京市印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

开本 850 × 1168 1/32 · 印张 16 · 插页 1 · 字数 420,000
1964年10月北京第一版 · 1964年10月北京第一次印刷
印数 0001—1350 · 定价（科六）2.60元

•

统一书号：15165 · 18(石油-5)

目 录

第Ⅱ章 非均质液体在多孔介质中渗流的基本特征.....	1
§ 1 有效渗透率及相对渗透率.....	1
§ 2 液气两相系统之渗透率-饱和度关系	2
§ 3 单一液相及单一气相所组成之系统的渗透率-饱和度关系 的解释.....	6
§ 4 根据单一液相及单一气相所组成的系统而获得的渗透率 与饱和度关系, 定性地阐明油气的多相液流特点.....	8
§ 5 不互溶双液系统的渗透率-饱和度关系	10
§ 6 不互溶双液系统之渗透率-饱和度关系研究结果的物理 解释.....	12
§ 7 三相系统之渗透率-饱和度关系	14
§ 8 “渗透率-饱和度”的定量关系	17
§ 9 利用岩石的毛管及电学特性计算可湿相的相对渗透率.....	18
§ 10 研究多相流体在多孔介质中渗滤时的物质守恒 (平衡) 定律	26
§ 11 运动定律	27
§ 12 一般的渗流方程式	29
第Ⅲ章 多相液体稳定流动问题	33
§ 1 概述.....	33
§ 2 气-油系统单向渗流	33
§ 3 气-油系统的平面径向渗流	35
§ 4 解决油-气非均质系统平面径向渗流问题的一般方法	41
§ 5 关于考虑石油真实性质的必要性.....	44
§ 6 油-水系统的稳定渗流	46
§ 7 水-油系统的径向对称渗流	48
§ 8 气-油-水系统的稳定渗流.....	51
第Ⅳ章 油井及注水井的生产特征.....	56
§ 1 定义.....	56

§ 2	均质液流之生产系数	57
§ 3	在油藏压力高于饱和压力时, 按生产井之压力及产量资料 确定生产系数	58
§ 4	非均质液体渗流时的生产系数	61
§ 5	当油藏在低饱和压力下工作时, 按井的产量及压力测量 资料确定生产系数	65
§ 6	按岩心分析资料估计生产系数	67
§ 7	生产系数的实际意义	69
§ 8	吸水系数的理论依据	73
§ 9	确定 $K_{M,n}$ 和 K_n 的实际意义	75
第IV章	非均质液体不稳定渗流问题。	
	没有气顶和移动边水的油藏动态	80
§ 1	概述	80
§ 2	液气两相系统的线性渗流	80
§ 3	应用已得到的关系式来研究采收率与井距的关系	84
§ 4	用有限差分法求解油-气非均质系统径向 不稳定渗流的问题[9]	86
§ 5	用有限差分法求解油-气非均质系统径向不稳定 渗流的问题。有关实例, 计算, 结论等的说明	91
§ 6	用稳定状态逐次替换法研究油-气非均质系统不稳定径向 渗流	97
§ 7	井底压力高于饱和压力时的均质液体渗流时期, 和 由均质向非均质液流过渡的时期。向一口井的不稳定 径向渗流	108
§ 8	第IV章第7节中所述方法的实例。结论。关于油井产量和 井距对采收率的影响	117
§ 9	无气顶且无明显移动边水的油藏, 在压力降到饱和压力 以下开采时的动态预测。概述	125
§ 10	无气顶且无明显移动边水的油藏, 在压力低于饱和压力下 开发时的动态预测。微分法	126
§ 11	有关例7的油田动态与特性参数的关系的理论结果分析	137
§ 12	关于微分方程式 [XV.10(14)] 之补充见解	138
§ 13	预测无气顶且无明显移动边水之油藏, 在溶解气驱方式	

下的动态变化。积分法	141
§ 14 无气顶且无移动边水之油田, 在地层压力低于饱和压力 下开采时, 油气性质对油田动态的影响	150
§ 15 无气顶且无明显移动边水的油田, 在压力降到饱和压力 以下开发时, 束缚水饱和度和渗透率-饱和度的关系对 油田动态的影响	155
§ 16 在压力降到饱和压力以后, 生产系数和产量之递减	158
§ 17 无原始气顶又无移动边水的油田之注气问题	163
§ 18 在无气顶且无移动边水之地层中注入气体滞留的影响	169
§ 19 关于无气顶又无移动边水之油田动态的一些实际结论	173
第IV章 具有原始气顶而无明显边水移动的油田动态。	
重力对油田开发动态的影响	181
§ 1 具有原始气顶但无明显边水移动, 并假定气顶不扩展入油 带时的油田动态	181
§ 2 具有原始气顶但无明显移动边水的油田, 当注气时并假定 气顶不会扩展入油带时的油田动态	187
§ 3 关于重力影响油田开发动态的一般看法	188
§ 4 当油沿构造往下靠重力渗流时, 确定其最大可能产量的 方法	189
§ 5 石油沿构造往下的不稳定重力渗流。近似理论	192
§ 6 当假设气顶会扩展入油带和油会沿构造向下作重力渗流 时, 没有明显边水移动之油田动态	195
§ 7 关于注气的某些实用见解和启示	202
§ 8 关于重力作用对油田动态的影响之一般见解	204
第IV章 边水部分推进的油田动态	207
§ 1 预测高于饱和压力时的油田动态	207
§ 2 预测油层压力低于饱和压力时的油田动态。两个近似 方法	209
§ 3 预测油层压力低于饱和压力时的油藏动态。另一近似 方法	217
§ 4 生产区再次饱和现象的矿场观察	228
第VII章 关井后得到的压力随时间变化的曲线的分析	230
§ 1 概述	230

§ 2	麦斯凯特提出的研究关井后压力恢复曲线的方法	230
§ 3	阿帕斯和史密斯提出的压力恢复曲线的研究方法	232
§ 4	关井后压力恢复的理论关系。在均质可压缩液体渗流情况下	234
§ 5	应用电模拟解决关井后压力随时间变化而恢复的问题	243
§ 6	考虑某些关井前液体不稳定渗流的情况	245
§ 7	在一口井中当关井后井内压力恢复的理论关系。在油-气非均质液流的情况下	247
§ 8	为了使液体密度或压力的分布达到实际上的稳定状态,而要求井以固定的产量生产的时间	250
§ 9	确定渗透率时所必需的关井期限	251
§ 10	利用关井后的压力恢复曲线确定地层压力	252
§ 11	准备投产井的有效性的估计	262
§ 12	注水井关井后压力降落的理论表达式	265
§ 13	采气井与注气井关闭后压力恢复曲线的分析	270
第XIV章	干扰现象	273
§ 1	油田之间大规模的区域性干扰	273
§ 2	同一油田内各个部分之间的干扰	274
§ 3	由于新井钻凿和投产而引起的压力和产量(或者产量不降)的降落	276
§ 4	研究和阐明井间干扰的矿场试验	277
§ 5	用可压缩液体在多孔介质中渗流的理论来解释干扰现象	281
§ 6	当地层压力降至饱和压力以下时之干扰试验	283
§ 7	均质不可压缩液体稳定流动时干扰的几何结果。井组(井数不多的)干扰的一般理论	284
§ 8	井数不多的井组中之干扰的几何效果举例	286
§ 9	位于直线无穷供给边缘附近的井组(由少数井组成)的干扰的几何效果	292
§ 10	在单一无穷井列中干扰的几何效果	295
§ 11	位于压力为常数的直线边界附近的一个无穷井排中相互干扰的几何效果	297
§ 12	在压力恒定的直线边缘附近,两个无穷井排相互干扰的	

几何效果.....	300
§ 13 在压力恒定的直线边缘附近的三个无穷井排相互干扰的几何效果.....	309
§ 14 按菱形布井时井排之间干扰的几何效果.....	312
§ 15 用等值渗滤阻力法估计干扰的几何效果.....	315
§ 16 存在不渗透边界(断层、地层尖灭或其他)时的计算.....	320
§ 17 当井在无穷地层中工作,并且产出的是可压缩液体时分析井干扰之一般方法。不渗透边界的影响.....	322
§ 18 确定封闭性油藏的平均压力.....	325
§ 19 关于干扰现象的某些结论.....	331
第四章 关于注水和注气的某些理论观点。	
论用水或气驱油	334
§ 1 引言	334
§ 2 沿直线布置的井网。产量的计算	337
§ 3 直线井排间井位相错的井网。产量的计算	342
§ 4 五点式井网。产量计算	345
§ 5 七点式井网。其产量之计算	345
§ 6 各种不同井网的水淹效率。问题的提出	350
§ 7 直线井网。水淹效率	352
§ 8 棋盘井网。水淹效率	355
§ 9 七点井网。水淹效率	356
§ 10 从开始注入到生产井见水的水窜时间之计算.....	358
§ 11 用一排生产井和一排注入井开采凝析气田。气淹效率.....	359
§ 12 向两面分注以开发凝析气田.....	362
§ 13 用一口位于圆心的注入井和一排沿圆周分布的生产井开发凝析气田。气淹效率.....	365
§ 14 在压力为常数的圆形供给边缘内部沿着和供给边缘同心的圆周分布的井排。水淹效率.....	367
§ 15 驱替液和被驱液之间界面的移动。解决此问题的理论性探讨.....	368
§ 16 驱替液和被驱液之间界面的移动。直线系统.....	370
§ 17 驱替液和被驱液之分界面的移动。平面径向系统.....	374
§ 18 驱替液和被驱液之间界面的形状.....	378

§ 19	解析法确定驅替液和被驅液界面形状的簡例	380
§ 20	利用电模型确定驅替液和被驅液的界面形状	384
§ 21	电位計模型	386
§ 22	电位計模型的理論	388
§ 23	运用电位計模型确定流度比対水淹系数的影响	391
§ 24	以 X 射綫照相为基础的模型	393
§ 25	渗透率的变化対水驅油的影响。由渗透率不同的夹层所組成的直綫系統	394
§ 26	本章第 25 节所述理論的推广	400
§ 27	貝克萊和列維萊特所建立的水驅或气驅油的理論	417
§ 28	运用貝克萊和列維萊特創立的水或气驅油的理論的实例	427
§ 29	用五点井网系統进行內緣注水注气时的預測方法	431
§ 30	試論貝克萊和列維萊特所創立的水或气驅油的理論之正确性	439
§ 31	油井改为注水井的过程	440
§ 32	預測注气过程的近似方法	449
§ 33	关于注水以保持油田压力的某些实用性評述	456
第 XX 章 运用因次分析和相似理論研究		
	多孔介质中的流动。模拟理論	465
§ 1	引言	465
§ 2	冷水驅油的模拟理論	466
§ 3	关于模拟冷水驅油的可能性	473
§ 4	热水驅油的模拟理論	479
§ 5	关于模拟热水驅油的可能性	484
§ 6	互溶液体驅油的模拟理論。建立模型的可能性	487
§ 7	対如何模拟用水或互溶液驅油的总的看法	491
§ 8	模拟冷水驅油以及利用它求得粘度比対油田动态影响(从数量上看)的实例	492
§ 9	非均质油气系統渗流的探索性模拟	496
§ 10	結束語	497

第Ⅷ章 非均质液体在多孔介质中 渗流的基本特征

§ 1. 有效渗透率及相对渗透率

上卷各章所探討的問題，都是假設多孔介质中流动的只是均质液体。如果說这一假設对于气田还是有效的話，那么，对于那些已降至饱和压力以下的油田說来，这一假設就沒有意义了。实际上，当压力降至饱和压力以下时，在多孔介质中流动着的是石油和从油中分离出来的天然气（非均质液体）。

在均质液流中关于存在着相当数量的束縛水的假設，在討論非均质液流时仍然有效；但只限于在油田压力尚未降至饱和压力以下时。对于气田來說也是如此。此一論断的根据是束縛水实际上是不能流动的^①，而只是減低了多孔介质的渗透率；只要注意到，倘有部分孔隙体积为不移动的束縛水所占据，則其流动阻力将比孔隙体积全为流动液体独自占据时要大些，那么就可充分地說明上述假設之正确性了。均质液体流动时，渗透率的减少将取决于孔隙中束縛水含量之高低。

进一步探討两相液流則可得出，其渗透性之降低会有不同情况，当不移动相能潤湿岩石且有集聚在最小孔隙和与顆粒表面相接触之傾向时，其渗透性降低情况将与不移动相未能潤湿岩石并在孔隙中連續分布时的情况不一样。这样一来，如多孔介质中含有多相流体时，絕不能把渗透率視為定值，并认为它仅与多孔介质的結構有关^②。

① 但必須指出，在水驅油时束縛水可被注入水所驅替（參閱Ⅰ.7）。

② 只有当多孔介质与滲流液体沒有相互作用时，渗透率才只与多孔介质的結構有关（第8和9节）。

当有不流动相存在时，即使只有一相在流动，其渗透性就会降低。从而证实，当多孔介质中有多相存在时，各相的通过能力应由每一相的渗透率来决定。这一渗透率值称之为有效渗透率，最常见的是以绝对渗透率的分数来表示，所以也称为相对渗透率。

根据上述，值得注意的是，可以认为在非均质液体渗流时，多孔介质中只有在局部孔隙中有流体通过，能让流体通过之局部孔隙体积，相应地取决于孔隙空间中所充填的各相液体饱和度分布情况。既然有效渗透率取决于饱和度之分布情况，所以它将因地因时而异，从水动力学观点看来，可以把非均质液体流动时的多孔介质，视为是一种渗透率随时间和随位置而变的系统。

把束缚水饱和度的分布视为定值之假设，可以看作是非均质液体流动时的一种特殊情况，此时把绝对渗透率乘以恒定的乘数后，便可得到对油或气的有效渗透率。

根据上述，若用数学分析法研究多相流体渗滤问题，则需要知道有效渗透率与饱和度的关系，而后可以建立渗滤的基本微分方程式。为此，下面将介绍研究渗透率和饱和度关系所得到的主要成果^①。

§ 2. 液气两相系统之渗透率-饱和度关系

最初用来测定液气两相系统的渗透率-饱和度关系的实验是用一装有不胶结砂的，直径为 2"，长度为 10 米的管子进行的^②。

非均质液体系统由含 NaCl 水（为了改善其导电性）和 CO₂ 所组成。试验所用的不胶结砂，其渗透率在 17.8 到 262 达西之间。试验管由 10 节绝缘胶木管组成，各管节彼此用青铜环箍联接在一起，青铜环箍本身又可作为电极，环箍还与测压计相连。这样，

① M. 麦斯盖特曾对这些成果加以系统整理（参阅文献[1]，本书即系根据这些资料编写，但在个别章节则曾做了些补充）。

② 参阅文献[2]，该论文曾以摘要形式发表于 AIME Trans., Petr. Dev. and Techn., 1937, p. 69.

各青铜环箍均可用来确定沿管流向的压力分布,也可用来量测其导电率。借助于在研究两相系统渗流以前所作出之校正曲线,就可以把测出的导电率换算为饱和度。

为了研究在液体饱和度和较高的区段内的渗流情况,则可以把溶有碳酸气的水注入砂层内,当降压时,碳酸气就会从水中释出;为了研究液体饱和度和较低的区段的渗流情况,可额外再多注入一些游离的碳酸气。在试验进程中,要不断地测出它的导电率,压力降,水和碳酸气的产量。根据所获得的资料,就可算出其渗透率,把这些数值视为是饱和度的函数而绘于图上(图1)。

两相系统中每一相之渗透率,在图上系绘示为相对渗透率(图1)。由图可见,对所研究的砂层而言,如绝对渗透率的变化范围在17.8—262达西之间,则相对渗透率与其绝对渗透率无关。

进而可见,不同的相对渗透率曲线还可反映出

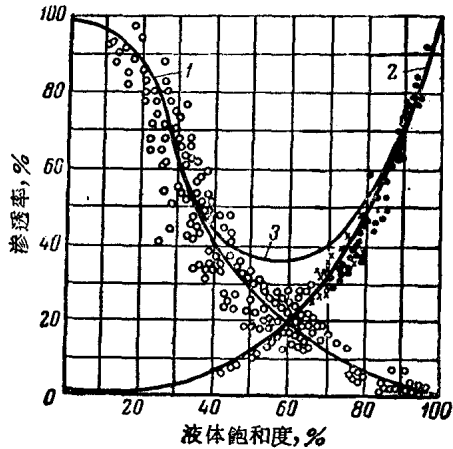


图1 对四种不同砂子所作出的渗透率-饱和度关系曲线[2]
1—气相渗透率(k_r); 2—液相渗透率($k_{ж}$);
3—气液两相渗透率之和

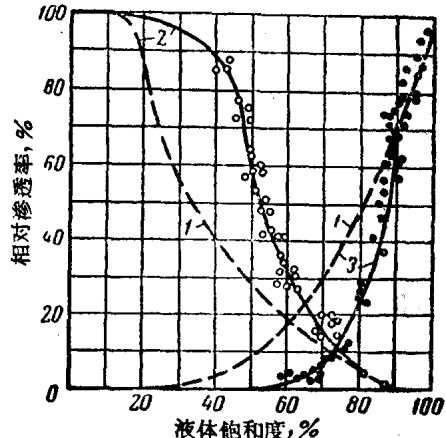


图1a 砂岩的渗透率的饱和度曲线; 及不胶结砂(渗透率为17.8达西)的相对渗透率曲线[3]

1—不胶结砂; 2—气; 3—液体

多孔介质结构之不同，孔隙结构则随颗粒的大小，形状和胶结程度也有所不同。

实验条件的改变并未在曲线上反映出来，诸如用在水中加糖的方法使水的粘度增达 3.4 厘泊，在水中掺入酒精使表面张力降至 27 达因/厘米等等。

用类似方法，对某一长约 1.5 米，渗透率为 495 毫达西和孔隙度为 21.8% 的砂岩岩心进行试验时所求得的结果则绘示于图 1 a 中[3]。在图 1 a 上还绘有对渗透率为 17.8 达西的不胶结砂岩所作出的相对渗透率曲线以供比较。在这些表征砂岩及不胶结砂岩的曲线之间，存在着性质方面的一致性，但在数量方面却有如下的差别：

1) 胶结砂岩中液相之相对渗透率曲线，随着液相饱和度的减低将急速地降低；

2) 若同时增大气相饱和度，则胶结砂岩中之气相相对渗透率曲线将迅速增大而趋近于总渗透率值 (100%)。

上面介绍的实验成果，它在试验时是使液相和气相同时流过多孔介质。另外有些实验则是用短岩心进行，事先使它饱和死油，再把气体注入。每次试验后称量岩心，便可确定其含油饱和度。这样一来，就有可能直接测定气相之有效渗透率。早先用直接从岩心中排液的方法，在短岩心上作出的那些相对渗透率实验结果，在定量方面是值得怀疑的，因为所选用的岩心长度不足以消除末端效应，而末端效应在液相饱和度较大而压力梯度也较高时其意义尤其重大。有些实验[4]曾经证明，气相相对渗透率之改变取决于油之粘度，但在另外一些试验却未能证实这一点[5]。

在近来的一些实验中，在不同的压降值下曾得到同一的相对渗透率曲线。而后在长岩心中也曾得到同样的结果[6]。在罗马尼亚的一些实验室中，一般是在很小的岩心上测定气相之相对渗透率[7,8]。这些用克里弗砂岩测定的结果，如图 2 所示。

图 3 所示为用 26 块白云岩岩心求得的相对渗透率之平均曲线[9]，它们介乎用砂岩和不胶结砂岩测定的曲线之间 (图 1 a)。

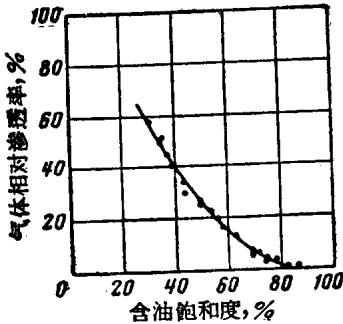


图 2 在肯宾那(罗马尼亚)实验室用克里弗砂岩作出的相对渗透率

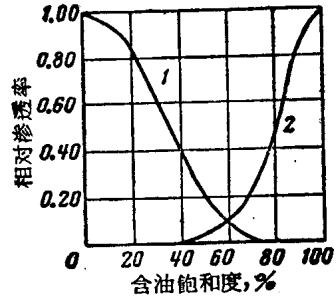


图 3 用 26 块白云岩岩心求出的平均相对渗透率曲线[9]
1—气; 2—油

上述这些实验结果, 对于由液、气组成的多相系统渗滤来说是很典型的。除上述论文外, 在文献中还有其他一些已发表的结果。为了比较用不同多孔介质所作出的相对渗透率曲线, 已把图 1, 1a, 3 所示的曲线叠绘于图 4 上, 而相对渗透率之比例曲线与饱和度的关系则绘于图 5 上, 图 5 上还列举了用毛细管束求出的相对渗透率曲线[10]。

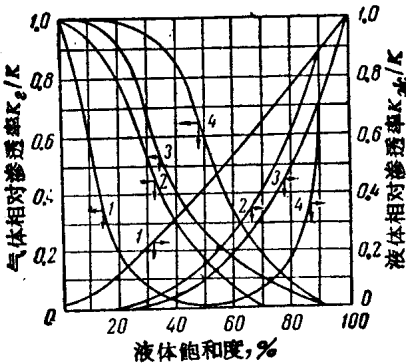


图 4 不同类型的多孔介质的相对渗透率曲线
1—毛细管束; 2—白云岩; 3—不胶结砂;
4—砂岩

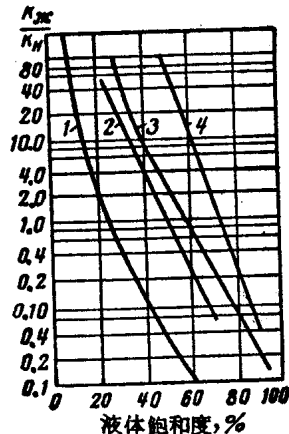


图 5 不同类型的多孔介质的相对渗透率比例曲线
1—毛细管束; 2—白云岩; 3—不胶结砂;
4—胶结砂

毛細管是最簡單的孔隙結構，它的單位孔隙體積中之表面積最小。所以，白云岩的相對滲透率曲線大体上最接近于毛管曲線；這也表明，白云岩內的滲流系發生于孔道和裂縫中。白云岩之非均質性主要是使單位孔隙體積之內表面積比起毛管束時要大[11]。這種單位孔隙體積之內表面對砂質介質來說將更大。大体說來，在砂岩中存在着大量的不參加流動但卻可能被液體飽和之孔隙。這就會使液相能開始滲流的最低的液相飽和度增大，而隨着氣相飽和度之增加，液相的有效滲透率則將迅速降落。

§ 3. 單一液相及單一氣相所組成之系統的滲

透率-飽和度關係的解釋

定性說來，各種相對滲透率曲線在下列各方面是一致的：

- 1) 當液相飽和度一旦低於 100%，隨着液相飽和度下降，滲透率就急劇降低；
- 2) 當液相飽和度遠大於零時，液相滲透率就趨近於零值；
- 3) 隨着液相飽和度之降低，氣相滲透率則急速上升；
- 4) 在液相飽和度還未降至零時，氣相相對滲透率就已達 100%；
- 5) 在某一氣相飽和度下，氣相之相對滲透率即可達零值。

這五個特征可作如下解釋^①。首先我們來觀察屬於液相方面的前兩個特點（潤濕相）。

因為液體是可濕相，所以不可濕相（氣體）起先占據孔隙空間中心部分。被氣所占之空間在流動時之阻力最小，因此當這些孔隙空間局部被堵塞後就將使液相的相滲透率大為降低。氣體飽和度不斷增大，就導致液相飽和度和液相滲透率的降低。終於使液相成為復蓋于顆粒上的薄毛管膜層，由於這一緣故而使液相滲透率將等於零。相滲透率等於零時液相之飽和情況可以理解為，在多孔介質顆粒的接觸處以液環形式存在；殘余的液體則可能占據

① 參閱文獻[1]，第 286 頁。

于大部分的孔隙中。残余饱和度的大小取决于颗粒之性质、形状及分布情况，也与胶结程度有关。

后面三种与气相有关之特点（不可湿相），可以如下理解。从孔隙的几何形状出发，必须假设只有在气相饱和度达一定数值时，气相在多孔介质中才以连续分布的状态出现。当溶解气从液体中分离出来时，这种成连续分布的状态是自发形成的。用排出法测定气相的相对渗透率时则未曾发现气相会自发形成连续分布的现象。曾经发现，当气体饱和度演变得高于某一定值时气相将以连续状态流动。此种最低的气体饱和度常小于从液相中分出气体时之饱和度。这一论断必需用实验来进行检验。由此可得结论：为了能使气相流动，必须使气体的饱和度达到某一最低的定值。

当气体饱和度低于某一最小值时，气体的相对渗透率等于零的问题实质，可以根据毛管渗流理论来阐释。假定气相是成球状分布，球状气泡的直径比流动方向上孔隙狭窄处的直径还要小，就可以作出结论，即气态小球泡将被液流所携带。如气球直径大于孔道窄处的直径，那么当通过狭窄处时，气球将遇到由于变形而引起之界面张力之阻力。使半径为 r_1 之气球通过直径为 $2r_2$ 的窄处时所需的压力降落 Δp ，可按下式估算，

$$\Delta p = 2\sigma \cos \theta \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

式中 σ ——可湿相与非可湿相之界面张力； θ ——接触角（此压差类似于最小的驱动压力）。

设令 $r_1 = 0.006$ 厘米， $r_2 = 0.003$ 厘米， $\sigma = 25$ 达因/厘米， $\theta = 0$ ，则可求得 $\Delta p \approx 8330$ 达因/厘米²。

由于所取的 r_1 及 r_2 之差值较大，故所得到的压力降落值 Δp 也较大。此数值表明，分散的泡滴即使未通过孔道狭窄处，但已能承受相当大的压力差。

倘若气泡膨胀并贴紧前后孔道之窄处，半径 r_1 及 r_2 将为同一数值，那么压力差 Δp 就变得最小；假设 r_1 比 r_2 约大 10%，我们得到的 $\Delta p \approx 1700$ 达因/厘米²。如果此一压差是依赖液相而

构成，而孔道长度設令其等于 0.01 厘米 的話，那么相当的壓力梯度將近 15.5 大氣壓/米。這樣大小的壓力梯度值，無論是在實驗室還是在地層條件下都是無法達到的；因此只有當氣體在孔隙中成連續相時，氣相才可能具有流動性。例外的是只有在井底附近氣體才能流動。只有當孔隙中氣相飽和度達到平均最小值，即相當於氣相成連續分布時，氣相才能開始流動。氣相滲透率從零起就迅速上漲並逐步超過了液相滲透率。最後液相滲透率將等於零，而氣相滲透率則達到均質液體的滲透率值，雖然在這個時候液相飽和度還可能比零值大得多。這一事實可以闡明，液相確實存在於最小孔隙中或在顆粒接觸處，它對氣體的正常流動不會有多大影響。

氣體滲流的发生是逐漸變化的，開始時是在有着較大隘口的孔隙中，而後蔓延到較小的孔隙中；液體滲流的停止最初是發生於小孔隙中，而後逐漸蔓延到較大的孔隙中。由上述可以得出結論，孔隙的大小，孔隙的形狀及其膠結程度，以至於其表面性質，從定量上說都會嚴重的影響到相對滲透率曲線的型式。

§ 4. 根據單一液相及單一氣相所組成的系統

而獲得的滲透率與飽和度關係，定性地闡明

油氣的多相液流特點

第Ⅴ章第 2、3 節所述的資料及見解，可以用來定性地闡明油層及氣層之開發特徵。

我們來研究下列相對滲透率曲線之特點：

- 1) 當孔隙中氣體飽和度小於某一大於零的極限最小飽和度值時，氣體的相對滲透率將等於零；
- 2) 隨著氣相飽和度的不斷增加，液相的相滲透率則不斷下降。

這兩個特點就顯出滲流的不穩定性。要獲得並保持穩定滲流時，只當氣體滲透率高於零時才有可能。在氣體滲透率已高於零