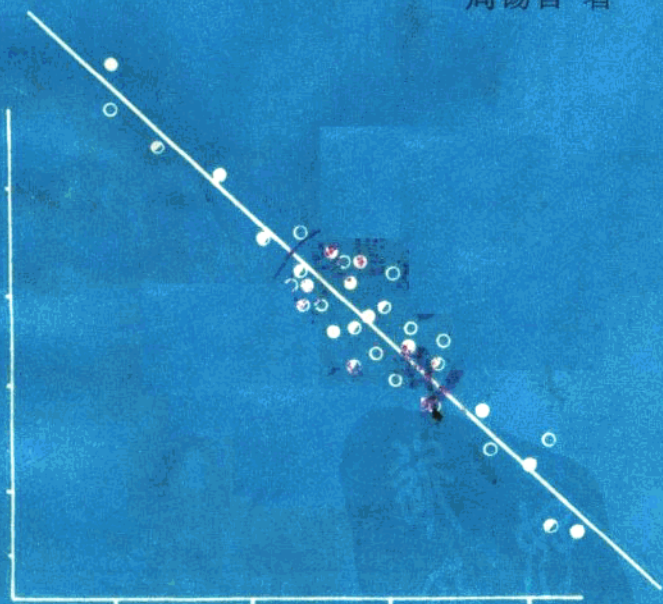


砂岩油气藏

原始流体饱和度

周锡智 著



石油工业出版社

序

如何比较正确地确定油气藏的原始油气饱和度，是油气储量计算中的难题之一，原因是利用油基泥浆或密闭取芯直接确定束缚水饱和度工艺较复杂，价格昂贵，一些大油田才有可能采用，况且获得的资料只能代表储集层中取芯井点的原始流体饱和度，而不能代表整个油气藏。利用毛管压力曲线及地球物理测井资料求储集层油气饱和度是目前各油田广泛采用的方法，但其误差有时较大，没有密闭取芯实测验证，使用起来不放心。实际资料表明，储集层物性变化大，或含油高度大的油藏，同一油藏的不同部位油气饱和度有很大差异。因此，做到正确地确定油气藏的原始流体饱和度，就必须研究储集层内油气饱和度的变化规律，正确地选用确定流体饱和度的方法。周锡智同志多年来致力于储集层油气饱和度形成基本条件及变化规律的研究，在此基础上，从储集层孔隙结构特征出发，利用各油区油基泥浆密闭取芯资料及毛管压力曲线资料研制出油气藏的原始束缚水饱和度的解释图版，并整理成“砂岩油气藏原始流体饱和度”一书。该书对正确地确定油气藏的原始油气饱和度，提高油气储量计算工作的水平无疑是很有价值的，对从事油田地质、油藏工程工作的技术人员也不失为一本好的参考书。

全国储委石油天然气专业委员会办公室主任杨通佑

1989年7月18日于北京

前 言

油气藏原始含油、气饱和度是计算石油、天然气地质储量、可采储量以及评价储集层的重要参数之一。目前国内外对此项参数已开展了多方面的研究,归纳起来主要有两大类:一是利用油基泥浆、密闭取芯方法来直接测量油、气层的束缚水饱和度,然后再寻找实际测量值与其它参数之间的内在关系,在此基础上建立原始饱和度解释图版;二是利用毛管压力曲线及地球物理测井资料等间接方法,来解释油气层原始含油、气饱和度。这些方法各有其优缺点,各家认识也不尽统一。作者认为用油基泥浆、密闭等特殊取芯方法来直接获得油、气层原始束缚水饱和度资料是目前取准原始流体饱和度最行之有效的办法。但此项资料只能代表此类取芯井点位置储集层中的原始流体饱和度,而不能代表整个油气藏,更不能代表其它油气藏的原始流体饱和度。例如,孔隙度、渗透率相同的砂岩,因其所处油藏部位不同,原始流体饱和度可以相差很大。这一点对研究特殊取芯方法获得的原始流体饱和度是至关重要的。以前,人们对此项资料的研究中往往忽略这方面的因素,单独寻求此类饱和度与物性关系,编制出原始含水饱和度与物性关系的解释图版,并用此种图版去解释整个油气藏的原始含水饱和度。实际上此种图版和特殊取芯井一样,仅能代表该井位置上储层的原始含水饱和度随物性的变化关系,不能用于整个油气藏的原始含水饱和度解

释，这一点已被大庆油气区大庆长垣不同位置上几口特殊取芯井的实测资料所证实。

1985 年，北京石油勘探开发科学研究院的高级工程师李淑贞同志，在开展“油藏原始流体饱和度变化规律研究”中，从油水驱动力学机制出发，把饱和度的变化归结于驱动力与毛细管压力之间的平衡关系，指出油水饱和度的分布在垂直剖面上受距油水界面高度的影响，在高度相同时，则受孔隙结构几何形态的影响。在不同含油气盆地的油藏间提出原始流体饱和度的变化主要取决于地层油-水密度差；提出在气顶中不仅存在着束缚水，还有油的影响（称为束缚油）等重要观点^①。在此基础上，作者利用我国东部五大油气区内的部分特殊取芯井油、气层岩芯物性、原始含水饱和度等分析资料，结合油气藏动态和静态资料及部分油气区内的部分压汞毛细管压力曲线资料进行了综合分析。从研究油气藏原始油气饱和度形成条件出发，总结出油气藏原始含油气饱和度的变化规律是：在储集层孔隙结构特征相似的任一油气藏内，当物性相同时取决于油气聚集驱动压力的变化（当油气柱高度相同时取决于地层油、气、水密度差的变化，或者当地层油、气、水密度差相同时取决于油气柱高度的变化）；当油气聚集驱动压力相同时取决于物性的变化；在储集层孔隙结构特征不相似的任一油气藏内，当物性、油气聚集驱动压力相同时，取决于压汞毛细管压力曲线上小于 $1.0\mu\text{m}$ 的小毛细管孔隙体积数量的变化。各种影响因素互补的最终结果，导致油气藏原始含油气饱和度的形成，一般是油气藏顶部高

①李淑贞，油藏原始流体饱和度变化规律研究，石油勘探开发科学研学院，1985，12。

于翼部，气层高于油层。同时指出用压汞毛细管压力曲线解释的原始含油气饱和度比油基泥浆、密闭取芯井实测资料偏高，其差值从理论上分析应等于含油气孔道中颗粒表面吸附的薄膜水饱和度。在此基础上，研究储集层孔隙结构特征相似的油气藏纯油气区内的含水饱和度解释图版时，主要从油层物性、油气聚集驱动压力方面出发，而研究储集层孔隙结构特征不相似的油气藏纯油气区中的含水饱和度解释图版时，除考虑油层物性、油气聚集驱动压力影响外，着重考虑压汞毛细管压力曲线上微毛细管孔隙体积数量的差异性。据此分别研制出既适合油藏也适合气藏的油基泥浆、密闭取芯资料和压汞毛细管压力曲线资料的含水饱和度统一解释图版，从而为砂岩油气藏提供比较准确的原始油气饱和度数据。

本书是在“砂岩油气藏地质参数解释原始油气饱和度图版研究报告”和“砂岩油气藏利用毛管压力曲线资料绘制原始油气饱和度解释图版研究报告”两篇论文合并加工的基础上，增补一些新的内容后编写成的，系方法研究书籍。在此对参加过上述两篇论文部分资料整理工作的冯超英、李玉文、冯峻同志及协助收集资料的万心焱、郑金安、王文录、桑鹤林等同志，以及在理论和方法上给予指导的裘亦楠、张志松、李贻贞、李宗信等同志表示感谢。望批评指正。

目 录

第一章 油气藏原始油气饱和度形成的基本条件及变化规律	(1)
第一节 饱和度基本概念及含水饱和度测定方法	(1)
一、饱和度基本概念.....	(1)
二、含水饱和度测定方法.....	(3)
第二节 砂岩油气藏原始油气水饱和度形成的基本条件	(11)
一、砂岩储集层孔隙结构的基本特点.....	(11)
二、油气聚集驱动压力.....	(12)
三、油气藏原始油气饱和度的形成条件与压汞毛细管压力曲线驱替原理相似.....	(15)
第三节 油气藏束缚水饱和度的变化规律	(16)
第二章 原始束缚水饱和度解释图版的编制方法	(28)
第一节 储集层孔隙结构特征相似的油气藏内油基泥浆、密闭取芯资料解释图版的编制方法	(29)
一、油基泥浆、密闭取芯井资料整理.....	(29)
二、油基泥浆、密闭取芯资料解释图版的编制方法.....	(38)
第二节 储集层孔隙结构特征相似的油气藏压汞毛细管压力曲线资料解释图版的编制方法	(65)

一、压汞毛细管压力曲线资料整理·····	(65)
二、压汞毛细管压力曲线资料解释图版的编制 方法·····	(70)
第三节 储集层孔隙结构特征不相似的油气藏的 油层和气层统一解释图版的编制方法 ·····	(77)
一、反映储集层孔隙结构特征的物性校正系数 C_2 ·····	(77)
二、中原、大庆油气区储集层孔隙结构特征不 相似油气藏含水饱和度解释图版的编制 方法·····	(79)
第四节 图版解释精度分析及图版应用·····	(83)
结论·····	(89)
参考文献·····	(92)

第一章 油气藏原始油气饱和度形成的基本条件及变化规律

油气藏系指具有统一油、气、水界面和压力系统的基本的油气聚集单元。油气藏类型按油气水分布与储层的关系可分为层状和块状油气藏；按储油、气层岩性可分为砂岩和灰岩油气藏；按储油、气层孔隙类型可分为裂缝型、孔隙-裂缝型、孔隙型油气藏；按油、气地下相态特征可分为纯气藏、纯油藏。砂岩油气藏的油、气多储集在储集层相对较大的孔隙喉道内，在储集层内油、气、水多以共存状态存在，各自占总孔隙体积的百分数称为流体饱和度。本书以砂岩油、气藏作为研究对象。

本章首先在简单论述油气藏内油、气、水饱和度基本概念和含水饱和度一般测定方法之后，着重对油气藏原始油、气、水饱和度的形成条件及油气藏原始束缚水饱和度的变化规律等方面进行一般理论性探讨。

第一节 饱和度基本概念及含水饱和度测定方法

一、饱和度基本概念

砂岩储集层中流体饱和度系指油、气、水在砂岩孔隙中所占体积的数量关系，即油、气、水各相饱和度的大小和分

布，或者就是单位孔隙体积内油、气、水所占的体积百分数。
其表达式为

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} = \frac{V_o}{\Phi \cdot V_t} \quad (1)$$

$$S_g = \frac{V_g}{V_p} = \frac{V_g}{\Phi \cdot V_t} \quad (2)$$

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} = \frac{V_w}{\Phi \cdot V_t} \quad (3)$$

式中 S_o 、 S_g 、 S_w ——油、气、水的饱和度，%；

Φ ——岩石孔隙度，%；

V_t ——岩石体积；

V_p ——岩石体积 V_t 中的孔隙体积；

V_o 、 V_g 、 V_w ——为岩石体积 V_t 中或者孔隙体积 V_p 中的油、气、水所占体积。

从大量现场试油、试气资料证实，油气藏一般由纯油、气段，油气过渡段，油或气水过渡段等组成。各段内的油、气、水在地层条件下存在于储集层中的形式是多种多样的。油多储集在砂岩的大孔隙喉道内，一般是可以流动的。也有吸附在孔道内颗粒表面不流动的残余油，如纯气段内的束缚油、纯水区以及纯油区被驱替后所剩的油都属于不流动的残余油，因此储集层中的油有可动油和残余油之分。气多以游离状态或溶解于油、水中以溶解气的形式存在于孔隙中，极易流动。水在砂岩储集层孔隙中存在形式：有储存在砂岩微细孔道中的残留滞水（毛细管滞水）和靠表面分子力作用吸附在大孔道颗粒表面上的薄膜滞水，这两种水均不易流动，

统称为束缚水；有储集在大孔隙喉道内可以流动的自由水，因此水也有自由水和束缚水之分。所以油气藏内流体饱和度的一般表达式为：

$$\begin{aligned} \text{因为} \quad S_o &= S_{o,i} + S_{o,r} \\ S_w &= S_{w,i} + S_{w,r} \\ S_o + S_g + S_w &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{或者} \quad S_{o,i} + S_{o,r} + S_g + S_{w,i} + S_{w,r} = 1$$

式中 $S_{o,i}$ 、 $S_{o,r}$ ——分别为可动油、残余油饱和度，%；

$S_{w,i}$ 、 $S_{w,r}$ ——分别为自由水、束缚水饱和度，%。

纯油区表达式为：

$$S_o + S_{w,i} = 1 \quad (5)$$

$$\text{或者} \quad S_{o,i} + S_{o,r} + S_{w,i} = 1$$

纯气区表达式为：

$$S_g + S_{o,r} + S_{w,r} = 1 \quad (6)$$

油气过渡区表达式为：

$$S_g + S_o + S_{w,i} = 1 \quad (7)$$

$$\text{或者} \quad S_g + S_{o,i} + S_{o,r} + S_{w,i} = 1$$

油水过渡区表达式为：

$$S_o + S_w = 1 \quad (8)$$

$$\text{或者} \quad S_{o,i} + S_{o,r} + S_{w,i} + S_{w,r} = 1$$

气水过渡区表达式为：

$$S_g + S_{o,r} + S_w = 1 \quad (9)$$

$$\text{或者} \quad S_g + S_{o,i} + S_{w,i} + S_{w,r} = 1$$

二、含水饱和度测定方法

(一) 取样方法

鉴于纯油、气层内束缚水的不流动性及油、气易流动性

的特点，人们设计出油基泥浆或密闭等特殊取芯方法。油基泥浆取芯并在取芯过程中采用的是无水（失水量为零）的油基泥浆钻进取芯，以保证无外界水浸入岩芯，因此在纯油气区所取的油层岩芯中所含的水量即可代表地层中原始束缚水量。密闭取芯并在取芯过程中采用的是含有适量示踪剂的泥浆（水基或者油包水泥浆），岩芯在钻进过程中随着进入密闭取芯筒中的密闭液里储存起来，以尽最大可能减少外界水浸入岩芯，所取岩芯均经示踪剂含量测定，其示踪剂含量为零或者微量时，就可认为岩芯内所含的水量即可代表地层中原始束缚水的含量。

油基泥浆或密闭取芯井钻取的砂岩储集层岩芯在提到地面时，为防止岩芯内流体挥发损失及外界对岩芯污染，多在岩芯出筒时立即在岩芯中心部位取岩样进行饱和度测定。测定结果唯含水饱和度可视为储集层原始含水饱和度，而直接测定的油气饱和度由于油气易流动，在把岩芯由井底向井口上提的过程中岩芯孔隙压力不断下降使油气体积膨胀挥发溢出岩芯，导致油气饱和度测量结果比原始含油气饱和度偏低，所以人们主要是研究油气藏纯油气区内的束缚水饱和度，而储集层原始油气饱和度则采用差减法求得。

（二）束缚水饱和度的测定方法^{〔1〕〔2〕}

1. 蒸馏抽提法

蒸馏抽提法仪器为扎克斯饱和度测定仪，测量原理是利用密度小于水、沸点高于水、溶解洗油能力强的溶剂，通过加热将岩芯中的水蒸出，经过冷凝而收集在水份捕集器中，直接读出水的体积。含水饱和度计算采用公式（3）。

此法测量含水饱和度是公认的比较准确的一种方法。其

优点是：方法简单，操作容易，能精确地确定出岩样内水的含量，蒸馏温度低。使含结晶水的矿物不易产生分解；缺点是：抽提时间长，对胶结好的渗透率高的岩样一般要 6~8 小时，而对渗透率低的岩样甚至用一天以上的时间也不一定完全抽提干净，胶结疏松的岩样易掉颗粒影响测量结果的精度。

2. 干馏-气相色谱法

干馏-气相色谱法，其测定过程是将岩样放进不锈钢制的封闭的干馏筒内，在 150°C 下连续烘 6 小时，待岩样中所含的水全部变成蒸汽后，放入冷却槽中冷却，然后利用乙醇能与任何比例的水互溶而不溶于油的特点，在干馏筒中加入定量乙醇，使乙醇充分萃取岩样中的水，用微量注射器取一微升乙醇的水溶液，注入色谱仪，在记录仪上自动记录水和乙醇的色谱峰值。再根据水的峰值与乙醇峰值的比值，从标准曲线上查出岩样中的含水量。

此法优点是分析速度较蒸馏抽提法快速、安全，对孔隙度，渗透率高的岩样分析的含水饱和度与蒸馏抽提法分析结果相近似；其缺点是对低孔隙度渗透率岩样分析结果往往偏低，即物性越差含水饱和度和偏差越大(见表 1)①，分析其原因是低孔隙度渗透率岩样因与干馏筒直接接触，岩样中的水虽经加热呈蒸汽状态，但在冷却时，筒中的水蒸汽就在干馏筒内壁上凝结成水珠或水滴，此凝结水中有一部分沿干馏筒与岩样接触处被毛细管力回吸到岩样中去。岩物性越差，毛细管力越大，回吸水量也就越大。若把岩样放置在干馏筒中的

①王之达，高含盐致密岩层的岩芯含水饱和度分析，中原油气田地质，1988，第一期。

金属架上，使岩样与干馏筒壁脱离接触，在乙醇浸泡岩芯时间为零时可提高岩样水的蒸出程度约 36%。

表1 文109井岩样不同测定方法水蒸出程度对比表

样 号	孔 隙 度 (%)	干 馏 法 S_w (%)	抽 提 法 S_w (%)
73	10.3	75.9	79.9
135	10.0	50.9	78.6
143	16.7	84.3	97.8
226	16.6	82.9	97.2
235	16.4	87.0	95.2

据此应对岩样与干馏筒直接接触的所有分析的含水饱和度和数据应作回收程度的校正。其校正方法是：对不同物性的岩样分别加入定量蒸馏水，然后按干馏—气相色谱法操作步骤作回收程度试验（见表 2），其结果绘制成含水饱和度减少值占实测值百分数 $\Delta S'_{wi}$ 与孔隙度关系图（见图 1）。

回归公式：

$$\Delta S'_{wi} = 1.508 - 1.1576 \lg \Phi \quad (10)$$

式中， $\Delta S'_{wi}$ 为干馏——气相色谱法分析蒸馏水饱和度绝对减少值占实测值百分数，以小数表示。

从图 1 看出：物性越差，其回收程度越差，所以对干馏—气相色谱法分析的蒸馏水饱和度在孔隙度小于 20% 时，应作下列回收程度校正。其校正公式为：

$$\Delta S'_{wi} = S'_{wi} \cdot \Delta S'_{wi} \quad (11)$$

$$S'_{wi} = S'_{wi} + \Delta S'_{wi} \quad (12)$$

表 2 干燥-气相色谱法水量回收程度试验数据表

孔隙度 (%)		15	14.6	19	20.1	17.3	17.9	13.5	20.5	18.1	15
水和度	加入水 S_w (%)	89	95.9	95.1	95.4	88.7	96.5	76.9	85.1	89.6	103.6
	实测水 S'_w (%)	73.8	88.3	92.6	91.6	81.3	93.0	63.8	85.9	84.8	93.0
	绝对差值 $\Delta S'_{wi}$ (%)	15.2	7.6	2.5	3.8	7.4	3.5	13.1	-0.08	4.8	10.6
	占实测值 $\Delta S'_{wi}$	0.205	0.086	0.027	0.041	0.091	0.038	0.205	-0.009	0.057	0.102

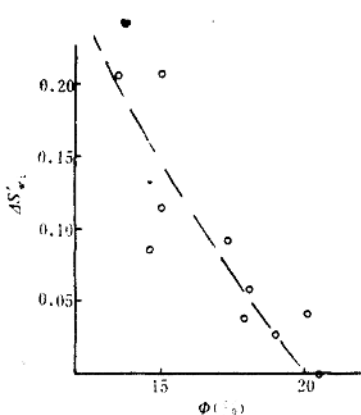


图 1 干馏-气相色谱法 $\Delta S'_{wi}$ 与 Φ 关系图

度为 30%，据(10)～(12)式依次求出干馏-气相色谱法分析的蒸馏水饱和度绝对减少值占实测值百分数 $\Delta S'_{wi} = 11.4\%$ ，水饱和度绝对差值 $\Delta S'_{wi} = 3.4\%$ ，相当于抽提法分析的蒸馏水饱和度 $S'_{wi} = 33.4\%$ 。

3. 研磨-气相色谱法

研磨-气相色谱法分析过程是：取一块岩芯中心部位样品分成均匀的两块，分别称重，其中一块除油恒重后分析孔隙度、岩石密度，另一块放入乳钵（已加入 20 毫升无水乙醇）里迅速研磨，然后将上面澄清液移入小瓶备用，其它步骤同干馏-气相色谱法。

其优点同干馏-气相色谱法，缺点是对于致密低孔隙度、低渗透率岩样，其分析数据偏低。从分析步骤可知，孔隙度、渗透率与饱和度为相邻不同块样品的分析数据。

综合上述三种测定束缚水饱和度的方法，从其分析步骤

式中 S'_{wi} ——干馏-气相色谱法实测的蒸馏水饱和度，%；

S'_{wi} ——相当于抽提法分析的蒸馏水饱和度，%；

$\Delta S'_{wi}$ ——干馏-气相色谱法分析蒸馏水饱和度绝对差值，%。

例如某块岩样孔隙度为 16%，干馏-气

相色谱法分析的含水饱和度

看, 无论那种方法分析的结果均属蒸馏水饱和度, 而实际油气层束缚水均含有一定数量的矿化度, 尤其中原油气区的地层水, 从大量试水资料证实, 其地层水总矿化度一般在 $25 \sim 30 \times 10^4 \text{ mg/L}$, 此点从干岩芯的表面, 以及电镜扫描资料的粒间孔隙中均可见到结晶盐, 这些现象充分证明中原油气区地层水含盐量是比较高的。

从盐的水溶解特性可知, 随着水溶液中盐的溶解量增大其体积也相应的增大, 其地层水总矿化度越高, 含盐的束缚水体积越大, 所以应对室内测定的束缚水饱和度作相应的含盐量校正。据此中原油田勘探开发研究院水质组在常压 17°C 条件下, 用纯 NaCl 与蒸馏水配制不同浓度的盐水测其体积增大率 (见表 3), 绘制盐水体积增大率与矿化度关系图 (见图 2)。

其盐水体积增大率与矿化度关系回归公式为:

$$Y = 0.0018 + 0.3053X + 0.0016X^2 \quad (13)$$

相关系数为 0.9900

式中 Y ——盐水体积增大率, %;

X ——地层水矿化度, 10^4 mg/L 。

对于含一定数量地层水矿化度的油气藏, 其实验室测定的束缚水(蒸馏水)饱和度必须进行相应的盐水体积增大率校正, 校正结果才能真实反映油气藏的束缚水饱和度, 其校正公式为:

$$\Delta S_{w_i} = S'_{w_i} \cdot Y \quad (14)$$

$$S_{w_i} = S'_{w_i} + \Delta S_{w_i} \quad (15)$$

式中 ΔS_{w_i} ——束缚水饱和度绝对增加值, %。

表 3 盐水体积增大率与矿化度关系表

地层水矿化度 (10^4 mg/L)	蒸馏水体积 (mL)	含矿化度水体积 (mL)	盐水体积增大率 (%)
0.125	200	200.03	0.04
6.25	200	203.98	1.99
12.50	200	208.05	4.025
25.00	200	217.35	8.675
31.25	200	222.25	11.125

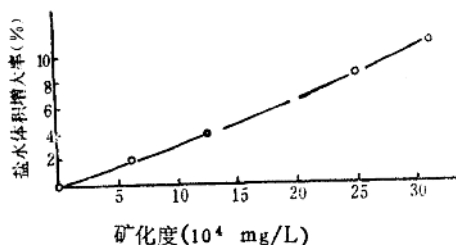


图 2 中原油气区盐水体积增大率与矿化度关系图

例如：濮城油气田沙二上油层，其试水资料平均总矿化度为 $25 \times 10^4 \text{ mg/L}$ ，室内测定某块岩样蒸馏水饱和度为 30%。根据 (13) ~ (15) 式依次求出盐水体积增大率 $Y = 8.63\%$ ，束缚水饱和度绝对增加值 $\Delta S_{wi} = 2.59\%$ ，含盐校正后本块岩样实际束缚水饱和度 $S_{wi} = 32.59\%$ 。