

12

油 層 性 質

苏联 格·凱·麥克辛莫維奇著

張 廣 智譯

燃 料 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書收集有關油滯以及油滯內所飽和油、水、天然氣各種物理性質的許多實驗資料。引示油和天然氣在油層條件下的體積，油和天然氣在水內的溶解度，油滯物理參數等數據。按油礦現有資料，近似地評定油、水在油層內所具的性質，以及有關利用物質平衡方程式來估計油、水在油層內的動壓力。

本書供油礦地質、採油工程技術人員以及石油科學研究機構和實驗室工作人員閱讀。

油 層 性 質

СВОЙСТВА НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1949 年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 Г. К. МАКСИМОВИЧ 著

張 廣 智 譯

燃料工業出版社出版(北京府右街26號)

北京市書刊出版業營業證可經出字第012號

北京市印刷一廠排印

新華書店發行

編輯：姚祖誥 校對：趙廣淵

書號 592 油 92

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 2 $\frac{7}{8}$ 印張 * 64千字 * 定價(9)六角一分
一九五五年十一月北京第一版第一次印刷(1—1,100冊)

前 言

如何合理地開採油田，在石油工業中成為日益重要的一個問題。研究油層的，以及研究油層內所含流体性質的各種方法和儀器的發明，使有可能更為明顯地理解石油從油層排向井底在机理上的概念，和擬定出使石油採收率達到更高的途徑。一些實驗室的研究工作，足夠令人信服的證明，祇要能夠對於石油從油層孔隙排代出來創造有利的條件，任何油層實際上都有可能採得 80% 的天然油儲量。

合理開採油田，在質量方面已經達到相當大程度理論上的解決。但是要把從理論上所導出的結論，應用到油層開採實際工作中，就必須有足供支配有關天然油滲以及油滲所含石油性質上的實際數據，同時還要能掌握有關石油和天然氣在油層孔隙中流動的種種條件。

關於油層的驅動方式以及各種參變數的實際數據，祇有從許多油礦集體工作人員來進行收集。有了這些數據之後，在油層開採理論方面所能創造出的，就不祇限於質量方面，而在數量方面的理論也能有所創造，這就是說還能夠創造出更為完善的油田開採工藝學，根據更為完善的採油工藝學，油田的採油率就能達到急劇地增加。

在這一本小集子裏面，是把有關採油工藝學的一些主要材料系統地加以敘述。

目 錄

前 言

第一章 油層的一般數據	4
1. 基本關係	4
2. 油滲性質	7
3. 岩樣的选取和分析	10
第二章 油滲的滲透率	14
1. 綫性滲透率	14
2. 徑向流動滲透率	16
3. 井底附近滲透率不同時的產油量	18
4. 圓形孔道和岩層裂縫的滲透率	20
第三章 油層水	23
1. 概述	23
2. 粘着水(封存水)含量的測定	24
3. 油層水的物理性質	26
第四章 天然氣性質	33
1. 氣態的基本方程式	33
2. 臨界压力和臨界溫度	35
3. 天然氣的壓縮係數	36
4. 天然氣在油層條件下的粘度	38
第五章 石油在油層中的性質	40
1. 石油在油層中和在地面上性質上的差別	40
2. 相態曲綫圖	41
3. 油層油的採樣和分析	43
4. 評定油層油性質的各种近似法	46

第六章 油層表面現象59

1. 比面積59
2. 表面力能和表面張力60
3. 边界角和潤濕選擇62
4. 由表面曲率所引起过剩的毛細管压力65
5. 在毛細管平衡情况下的油層飽和度69
6. 排代压力(置換压力)70
7. 砂層的有效滲透率72
8. 殘餘石油飽和度73
9. 提高砂層產油量的方法74
10. 分子表面各种因素對於石油在孔隙介質中流動所發生的影响75

第七章 油層在各种不同驅動方式下的採油率78

1. 藉液体膨脹作用而採得的油量79
2. 在油層內有游離氣體時的產油量80
3. 在油層內注氣的產油量83
4. 在帶有氣帽油田中的氣油比84
5. 油層帶有游離氣體的產油量84
6. 水压驅動油層的產油量85
7. 對於水压驅動油層的物質平衡公式85
8. 對於在開採以後的油層压力計算法87

參考文獻88

第一章 油層的一般數據

1. 基本關係

油層最重要的性質，是保證油、氣集滯而具有的孔隙性。油層孔隙空間的有效容積，可能由下式求出：

$$V = ah \times f(1 - I), \quad (1)$$

上式， V ——油、氣在油層孔隙空間所佔有的容積，公尺³； a ——油層含油部分的面積，公尺²； h ——油層厚度，公尺； f ——孔隙率（單位油層體積的孔隙部分）； I ——粘着水（封存水）在油層中的含量係數（見 24 頁）：

在油層孔隙中滯的液、氣體混合物，今後定名為油層液，而在油層極小孔隙內所封存，或者粘着於各個別岩粒相互接觸點上的水，則定名為粘着水或封存水，因為這種水，是不參加在油層開採時所發生液體沿油層的一般流動的。

在油層着手開採以前，存在於油層內的油液的體積，由下式求得：

$$X = \frac{V}{J_1}, \quad (2)$$

上式， X ——在標準壓力和標準溫度下^①油液的體積； V ——油層孔隙空間的有效容積； J_1 ——在油層條件下的油液體積變動係數，就是單位體積的脫氣油液在油層孔隙中所佔有的容積。

J_1 （油層液體積係數）這一個數值，係表示油液在油層條件

① 所謂標準壓力，是水銀柱高 760 公厘的壓力；所謂標準溫度，是 0°C。

下，由於氣體在油液內溶解以及溫度的升高而增加體積的特性。

倒數 $\frac{1}{J_1}$ 爲油液收縮係數，表示油層液於採達地面時體積減縮的特性。

對於油田深部來說，油層液完全被氣體所飽和時， J_1 值可能爲 1.6—1.7，而在天然氣凝析的油田中，這一個數值還要高一些。

採油時，油井井底周圍的油層壓力發生降低，油液才從較遠地帶開始流入井內。如在這時油層容量保持不變，像在沒有邊水活動的情況下，則由井輸出的油量（產油量），可能由下式求出：

$$r = V \left(1 - \frac{J_1}{J} \right), \quad (3)$$

上式， r ——可採出油量，公尺³； V ——油層孔隙空間有效容積，公尺³； J_1 ——油層液開始時的體積係數； J ——油層液在一定的油層壓力和油層溫度下的體積係數（這種壓力和溫度要比開始時低）。

於採出的油液爲 r 公尺³ 時，從油層內所採出的氣體越多， J 值就越小。由此得出結論，就是在油氣比高的情況下從油層採出的油量，應當較在油氣比低的情況下所採出的油量少得多。

公式 (3) 常被稱爲體積平衡方程式，這一個方程式，係用以計算假定油液在油田內體積不變的採油量。

在各種不同開採方式下的油層產油量，可能由具有如下所示的方程式求得：

$$r = mn \frac{V}{J}, \quad (4)$$

上式， r ——油層產油量，公尺³； m ——排換係數（交替係數）；

n ——在油層邊緣各部分的產油係數； $\frac{V}{J}$ ——在這一瞬間以前，存在於油層內的油液體積公尺³。

排換係數 m 指示出，哪一部分油層是由於邊水或者天然氣的推進排換而已經把油液排放乾淨。例如，油層的全部孔隙總容量為 5 000 000 公尺³，而從總容量內有 4 000 000 公尺³ 的容量已被邊水進入所淹灌，則排換係數為下式：

$$m = \frac{4\,000\,000}{5\,000\,000} = 0.8$$

產油係數 n 指示出，有多少油液已經從在油層原有儲量的單位容量內採取出來。對於油層上任何點來說， n 這一個數值不是保持不變，而是依於油層孔隙空間所具的特徵，以及液流沿油層排替的流動速度的不同而改變的。例如，直接靠近注水井井底的產油量，就要比在邊水邊界上的產油量高得很多。因此， n 係數的數值，就能按對於油層各個別地段產油量的平均值來求得。

天然油藏所具的特徵，就是它的不均勻性。油層的面積，可能從幾十公頃起，大到幾千公頃。油層厚度也是從一公尺的幾分之幾，變動到好幾十公尺，油層孔隙率則可能從百分之幾改變到 25—30%。特別大的變動是在油藏的滲透率方面，甚至在同一油井岩層剖面範圍以內，滲透率的變動可能有好幾千倍的差別。儘管如上所說，油層構造是這樣的不均勻，但在油層極大多數的點上所得到的某些平均指標，可足以明晰地表示油層在水動力上所具的特徵。因此，對於解決在油田開採方面實際問題而應用產油量理論的可能性，要依於這層油層所勘查研究的程度來決定。在油層各不同點上油層性質的研究工作進行得越詳細，則對於油田開採個別問題可能得到的答案就會

愈確切。

2. 油 瀝 性 質

一般有石油存在的沉積岩層，是由各種不同大小，形狀的個別礦物顆粒所組成。最爲普遍的一些沉積岩層顆粒的大小尺寸，示於表 1。

按岩石顆粒大小的岩層分類

表 1

岩 粒 大 小 尺 寸 (公厘)	岩 層 名 稱	
	不具有膠結性的	具有膠結性的
>2.5	礫石層	礫岩層
2.5—1.0	極粗粒砂層	粗礫砂岩層
1.0—0.5	粗粒砂層	粗礫砂岩層
0.5—0.25	中粒砂層	中粒砂岩層
0.25—0.125	細粒砂層	細粒砂岩層
0.125—0.062	極細粒砂層	細粒砂岩層
0.062—0.005	軟泥層	頁岩層
<0.005	粘土層	頁岩層

如個別砂粒都爲相同直徑的理想球體，則這種岩層的孔隙率，就能依於岩粒排列位置密度的不同而變動於 25.9% 到 47.6% 這一個範圍以內。

舉例來說明，直徑爲 d 的八個球體，按兩層排列，使這些球體的中心構成一個立方體(圖 1)。在正方形裏面的每一球體的一部分體積，等於一個球體體積的 $\frac{1}{8}$ ，而正方形實體部分的總體積則爲：

$$8 \times \frac{1}{8} \times \frac{\pi d^3}{6} = 0.524d^3.$$

由此得立方體的孔隙空間容積爲：

$$d^3 - 0.524d^3 = 0.476d^3,$$

而岩層孔隙率為：

$$\frac{0.476d^3}{d^3} 100 = 47.6\%.$$

現在來把上排岩粒的排列位置移動一下，使在上排的每一球體排放在下面四個球體的上面。岩粒在這樣的排列方式上是最緊密的(圖 2)。求出岩粒在這樣排列時的岩層孔隙率。

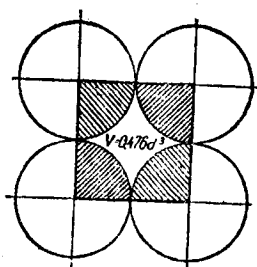


圖 1 砂粒的立方形排列

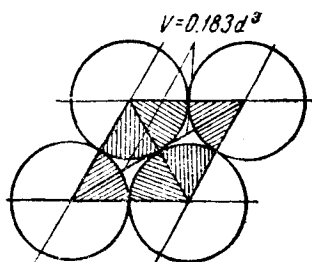


圖 2 砂粒的菱形排列

在這種情況下，球體中心所構成的已經不是一個立方形，而是一個斜方六面形(菱形)。菱形的容積，我們曉得是等於 $0.707d^3$ ，在菱形容積內，砂粒所佔有的總體積，則仍和在正方形內一樣，等於 $0.524d^3$ ，但菱形的孔隙容積，在這種情況下為 $0.707d^3 - 0.524d^3 = 0.183d^3$ 。

由此得岩層孔隙率為：

$$\frac{0.183d^3}{0.707d^3} 100 = 25.9\%.$$

真正的岩層孔隙率，則變動的範圍相當大，這是由於岩層的個別顆粒並不是球體，而是具有非常複雜的形狀。由粗砂粒所構成的孔隙的內部，也可能散佈有更細的砂粒，這就會引起孔隙率的大大減低。除此而外，在天然的岩層裏面，常存在有

膠結物，這種膠結物一般為粘土或者碳酸鈣，又使孔隙率還要更加減低得多。因此，對於極大多數的油砂層來說，孔隙率很少能超過 25—28%。在砂岩層中的孔隙率可能降低到 5—6%^①。

在由碳酸鹽類所構成的油瀝裏面，就是說，在由石灰岩和白雲岩所構成的油瀝裏面，所以有孔隙，在極大多數情況下，是由於含有二氧化碳氣體的水，對於碳酸鈣和碳酸鎂發生溶解作用的結果。依於這些溶解過程強度的不同，石灰岩層的孔隙率可能有極大範圍的變動。在碳酸鹽類油瀝中的孔隙大小，也是有極大的不同：從要用微米才能進行量計的極小孔隙起，到好幾公尺大小的洞穴為止都有。

屬於特殊例外的，祇有所謂一種鯛狀石灰岩岩層，這是由滾圓的石灰岩粒被碳酸鹽類物質膠結在一起組成的。這些石灰岩的孔隙結構，是和砂岩孔隙結構差不多的。

由於個別砂粒所佔的面積極為微小，而這些砂粒包裹在一起的密度又相當大，岩層孔隙空間的面積就可能達到巨大的尺寸，這就使從含油岩層中，要把所含油液全部採出這一個任務，更為複雜。

由具有相同直徑的球形顆粒所組成的多孔介質的孔隙率，是容易計算出來的，當這些球體為菱形排列時（孔隙率 25.9%），岩層孔隙在 1 立方公引（呎³）（ $100 \times 100 \times 100 = 1\,000\,000$ 米³）油層孔隙容積的表面面積 F ，應為：

$$F = \frac{4480}{d} \text{ 公頃,}$$

上式， d ——岩粒的尺寸，公厘。

在不少油田內的砂粒平均尺寸，一般是變動於從 0.05 到

① П.П.阿夫陀斯果[37]，所製定在油瀝岩石磨片上研究孔隙空間的結構和幾何形狀的方法，蘇聯科學院ИГИ出版。

0.25公厘限度以內。這時油層孔隙空間的表面面積爲：

當 $d=0.05$ 公厘時， $F=89\,600$ 公頃，對於1立方公引
(m^3)的油層孔隙容積來說。

當 $d=0.25$ 公厘時， $F=17\,920$ 公頃，對於1立方公引
(m^3)的油層孔隙容積來說。

對於天然油層來說，所藉以組成油層的岩粒都是屬於不規則的形狀，則孔隙空間的表面面積就要更大一些。

這樣巨大表面面積的油層孔隙空間，就說明爲什麼從油層裏面不可能把全部油液都採取出來的原因所在。保存在個別岩粒上面的油液薄膜，總計起來，就有好幾百萬噸，這幾百萬噸石油，應用一般的採油方法，是不可能採取出來的。

祇有詳細研究一些在表面上所顯示的種種現象，而這些現象，是在岩層——石油，岩層——水以及石油——水相互接觸的分界面上產生出來的，並探明在油層孔隙裏面的毛細管作用，才能有助於增加油層產油量這一項任務的解決。

最近幾年以來，不少蘇聯科學著作家們製定出測定孔隙體和分散體比面積極爲完善的各種方法。最具有重大意義的，要算蘇聯科學院通訊院士B. B. 捷亞格的著作，〔29,30〕，在他的著作裏面，精密研究這種方法的理論，並述及應用這種方法進行試驗檢查所得的結果。在1948年，B. B. 達瓦羅夫〔31〕則以量測空氣滲透率作爲基礎，而發表有對於一些粉末狀物質比面積的量測方法。

3. 岩樣的選取和分析

就鑽井時所採得的岩心，進行選樣和分析，這是對於油層產油率和油層結構進行數量上評價唯一可能實現的方法。廣泛採用的電測測井法，它的進行和解釋在現有技術條件下，祇能

對於油層含油性能給予在質量上的評價，因此，對於油層全部性能的說明，顯然是不夠的。所以在採油井內，特別是在鑽井通過產油層的時候必須進行岩心的採取。岩心分析使有可能確定每一層薄夾層的孔隙率和滲透率，說明這些油層所含油、水、氣的飽和程度，測定油層的可能產油量，而結果就能獲得關於油層孔隙空間的概念。

這些數據，首先對於採油井來說，是絕對必要；因為有了這些數據以後，不論是初次開採的油田，還是二次開採的油田，就有可能更為正確地計劃出油田開採方案。

考慮到油層在結構上的不均勻性，一般對於絕大多數的油層，都應極力設法做到採取最大數量的岩心，不論是沿着油層走向，或者油層厚度，都要這樣來做。

對於油礦儲油量的評價，大抵都是以從配佈在油礦邊緣地帶的一些油井所採取的岩心，進行兩三次岩層孔隙率的測定作為根據，這顯然對於油田油層可採儲量的評價是不夠的。在採油範圍以內的一些油井，一般是不採取岩心，因此，油礦地質工作者就只有按電測測井曲綫圖來提出產油性能的評價，這是不能做出油層在產油量上的鑑定的。

毫無疑問，如在所有採油井全部採取岩心，即使祇限於產油層，特別是考慮到現有的採取岩心技術還不夠完善這一點，這是一項極端困難的任務。因此，在實際工作中解決這些任務最切實可行的辦法，就是應當把油層性質的研究歸結到進行綜合的探測；這種綜合探測，是按均勻配佈在油層面積上的個別地質控制井來進行的，同時把對於電測測井曲綫數據和以研究岩心作為根據直接測定的油層性質，這兩者之間的對比關係規定下來。

這種綜合探測應包括下列各項：

1) 電測測井法的探測，這是按各種不同的電極距來進行的；

2) 機械測井數據，也就是在所開採油層的範圍內，按深度間距來確定井的鑽進速度的數據；

3) 藉助於井徑規量計井徑，給出在剖面上確定粘土薄夾層的可能性；

4) 在剖面上產油層部分，全部採取岩心。

具有上述各項數據之後，應有可能更清晰地進行電測測井曲綫圖的解釋，一直達到繪成鑽井地質柱狀剖面圖為止。

依據各地質控制井有了明晰的電測測井曲綫圖的解釋之後，就有可能把再進一步進行的探測工作，祇限於電測測井曲綫的研究，這些研究，在規定有正確合理對比的情況下，是有可能得到足夠確切的解釋的。

选取岩心時必須極力做到這一點，就是要使在井剖面上每一公尺不應少於3—4個岩樣，所取岩樣的直徑為60—70公厘，而長度為35—40公厘。祇有在這種情況下，才表示有可能按每一地質控制井繪製出岩心柱狀剖面圖，使能確定出在沿油層厚度上油滲性質的改變。單按一兩個岩樣來對於油層進行評價，可能祇會歪曲油層產油性能的概念，因為在油井剖面範圍以內的薄夾層，所給出的指標，可能相差幾十倍甚至於幾百倍（特別是在油層滲透率上面）。

所選採的岩心，首先要經過仔細地外形檢查，檢查結果，記入專用的岩心記錄簿內。在記錄簿內標示下列各項的岩樣性質：

- 1) 顆粒性，個別岩粒的外形，砂粒的機械組成（粒徑組）；
- 2) 膠結性的程度以及膠結物質的組成成分；
- 3) 岩石組成成分；
- 4) 存在的裂縫和層理面。

岩樣外形檢查完畢以後，就把岩樣送到實驗室進行測定工作：

- 1) 孔隙率，
- 2) 滲透率，
- 3) 油水飽和度，
- 4) 氯化物的含量。

當確定油——水或者油——氣接觸面的深度時，應當注意到在油層內從氣到油和從油到水的過渡地帶是逐漸進展的。從純氣到油過渡地帶的深度，可能達到 2.5—3.0 公尺；而從氣到水過渡地帶的深度，可能達到 1.7—2.0 公尺。從油到水過渡地帶的深度，則依於油瀝性質的不同而變動於從 2 到 10 公尺限度以內^①。

1947 年蘇聯科學院通訊院士 M.A. 卡畢留什尼可夫，С.Л. 薩克斯在實驗室內，製定出極為便利的測定岩心含水和含油飽和度的方法〔1〕。他們敘述構造簡單而又為每一個實驗室都能採用的一些測定儀器，這些儀器都是根據應用溶劑將水從岩樣中蒸餾出來，同時把石油萃取出來的原理製造的。

С. Л. 薩克斯所研究出的測定方法和儀器，目前在油礦方面得到廣泛的採用，大家一致認為這在分析岩心含油和含水飽和度方面，是一種合乎標準的方法和儀器。

① 關於測定油層物理性質各種參變數，參閱 M.A. 格伊馬納的論文〔33〕。在這篇論文裏面，概述鑑定油瀝性質的各種方法（孔隙率，滲透率，油、水飽和度等）。

第二章 油層的滲透率

1. 綫性滲透率

油層滲透率，就是油層所具液体或者氣體滲濾的性能，這是油層所具最重要特徵之一，它可以決定油井產油量，並且在一定程度上也決定着總的採油率係數。測定油層滲透率，是以達西定律為根據，這一定律，可以寫成下式：

$$q = K' a \frac{dP}{dx}, \quad (5)$$

上式， q ——液体每秒的流量， a ——岩層的橫截面面積， $\frac{dP}{dx}$ ——在 x 軸向上的壓力梯度，這種方向，是和液流的方向符合一致，而和岩層的橫截面相垂直， K' ——對於某種液体來說，岩層所具的滲透率。

滲透率 K' 和液体的動力粘度成反比例，因此，可以列為下式：

$$K' = \frac{K}{\mu}, \quad (6)$$

上式， K ——對於任何粘度的液体來說的岩層滲透率。

因此：

$$q = \frac{K}{\mu} a \frac{dP}{dx}. \quad (7)$$

滲透率 K' 可稱為比滲透率，也就是單位粘度的滲透率。

在滲濾理論裏面，常常引用 $K'' = K' eg$ （式內， e ——液体密度， g ——重力加速度），稱為達西滲濾係數。

由達西定律得知，滲透率就是以動力粘度等於一的液体或氣體，在穩定滲濾的條件下(當壓力梯度等於一個單位時)通過多孔介質單位橫截面面積量計出的流量。

滲透率的單位的採用達西(Дарси)(以後採用縮短標号 da)，它是這樣的多孔介質的滲透率：當壓力梯度每公分為水銀柱高 760 公厘的情況下，粘度為 1 厘泊的液体在 1 秒時內通過 1 公分² 橫截面面積多孔介質 1 公分³ 的流量。一千分之一達西則稱為毫達西(Миллидарси)(此後以 mda 標示)。

滲透率具有面積因次：

$$[K] = L^2.$$

在 x 軸向上多孔介質的綫性滲透率 K_x ，按達西定律(7)，用下式求出：

$$K_x = \frac{\mu q_x}{a_x \frac{dp}{dx}} = \frac{\mu v_x}{\frac{dP}{dx}}, \quad (8)$$

上式， $v_x = \frac{q_x}{a_x}$ 為液体每秒的流量，屬於橫截面單位面積，而具有綫速度的因次。

在極簡單的情況下，應用不可壓縮液体，求岩層滲透率時的公式，可列為下式：

$$K = \frac{\mu q L}{a(P_1 - P_2)}. \quad (9)$$

例題 1. 求直徑 $d=19$ 公厘；長度 $L=25.4$ 公厘岩心的滲透率。

當水通過岩樣進行滲濾時，曾得到下列各數據：水通過岩樣的壓力梯度 $P_1 - P_2 = 2.82$ 大氣壓，每秒的液体流量 $q = 2$ 公分³/秒。

水在正常溫度時的粘度為 0.884 厘泊。

把這些數據代入公式(8)，得：

$$K = \frac{0.884 \times 2.0 \times 25.4}{\pi/4 \times 1.9^2 \times 2.82} = 0.56 \text{ 達西}(\text{da}) \text{ 或 } 560 \text{ 毫達西}(\text{mda}).$$