

油層工程概論

黃錦滢
郭明哲
張日炎
曾雲驥

編著

採叢書之四



台灣油礦探勘處
中國石油學會

油 層 工 程 概 論

探探叢書之四

黃郭張曾
錦明日雲
澄哲炎驥
編 著

臺 灣 油 礦 探 勘 處

中 國 石 油 學 會

中 華 民 國 六 十 一 年 五 月 出 版

10/01/21

探採叢書編譯小組

召 集 人： 靳叔彥

副召集人： 黃錦滢

委 員： 林 宏 汪傳瑜 李漢津
李恨之 張日炎 陳瑞祥
潘玉生 郭明哲 張錫齡
韓恕一

幹 事： 李恨之

序 言

「油層工程概論」係取自中國石油股份有限公司石油技術訓練班專業教材之一，該教材專為發給受訓學員研習者，刊印後深得與業務有關同仁歡迎。經徵得技訓班劉主任魁餘之同意，將各種有價值資料，諸如鑽井工程設計、採油工程設計、油氣井測試、鑽探試驗等委請中國石油學會採探組修訂編印成專冊，藉供將來專業訓練，以及與業務有關同仁進修或參考之需。

本公司在台經營油氣開發廿餘年，所獲技術及成果，不論在量與質的方面均有長足進步；但對鑽井及採油工程技術上作專業性及有系統的介紹，以此為創舉。其內容係由具實地經驗之專業人員經廣泛收集資料整理研究而得；並聘請採探組委員詹益謙、楊舒、杜學林、黃錦滢、董樹勳、李漢津諸先生審訂，其內容甚為豐富與實用。

該叢書承劉主任魁餘，各審定委員之協助下，得以順利完成刊行，順此誌謝。

中國石油股份有限公司協理兼
臺灣油礦探勘處處長 吳 德 楨

民國六十一年五月一日誌于苗栗

前 言

石油事業之探勘、鑽井、生產、煉製、石油化學、儲運、銷售及近代企業經營研究等項的發展，誠屬大有一日千里之勢。至於此工業之人力資源之品量增進，確更為重要。中國石油公司於民國五十八年創設石油技術訓練班，甄選工作人員，施以專科教育，為石油事業培植基層人才。因國內暨缺石油事業之專業教育，亦無此項合適教材，乃由中油公司委請石油學會轉聘學驗湛深之資深會員，編撰有關之書籍，專供教學之用。「油層工程概論」即為此項專業教材之一。

此書係經聘請致力石油事業多年，學驗兼豐之本學會會員黃錦濤、郭明哲、曾雲驥及張日炎諸先生聯合編撰。取材方面除參考國外各種油層工程文獻外，並以編者從事油層工程實際經驗，遍舉各種實例，以充學用。惟各位編者於公餘撰成，又專業詞彙術語尙欠完備統一編制，簡偏之處或所難免，尙祈海內外諸先進不吝予以匡正為幸。

中國石油學會技術委員會 新 叔 彥
採探組委員會主任委員

民國六十一年五月謹識於台北

目 錄

第一章	油氣層工程基本	1
第二章	油氣層內液體流動	21
第三章	天然氣層	44
第四章	凝結油氣層	77
第五章	油氣井壓力上升試驗	105
第六章	氣井生產性能試驗	141
第七章	油井生產性能試驗及生產曲線	179
第八章	地層污損及井激勵處理	206
第九章	未飽和油層	225
第十章	綜合驅動之油層	253
第十一章	油氣層開發計劃	291

第一章 油氣層工程基本

一、前 言

採油工程師要想對於油氣井做性能之分析，解釋或預測，必須要對於流體在地層中流動的原理有所瞭解，同時還得能應用若干油層工程的常識，方能勝任。本章係就一般油氣工程之基本，略予介紹。

二、孔率 (Porosity)

油氣均儲集在岩層之孔隙裏，孔隙的大小與油氣儲集的量有直接的關係，平常我們把岩層所具有孔隙大小，叫做孔率，其定義為：

$$\text{孔率} = \frac{\text{岩樣孔隙的總體積}}{\text{岩樣的總體積}} \dots\dots\dots (1-1)$$

孔率通常以希臘文PHI, ϕ 代表，且以分數（如0.20）或百分比（如20%）表示之。一個岩樣的孔率是0.20，係指岩樣孔隙總體積佔岩樣總體積的20%。

孔率的定義有了，但是在應用時要注意下列五點限制：

1. 岩心要够大，且能够代表岩層者。
2. 裂縫與孔隙不同，雖然裂縫與孔隙同樣地可以儲集油氣，但有裂縫的岩心，不能以試驗定其孔率。
3. 石灰岩孔隙變化甚大，不似砂岩的均勻，所以做試驗時，要用整塊岩心，而不能自岩心上切取一小塊為試樣。
4. 就是同一岩層，因為顆粒、稜角、沉積、膠結等變化，孔率不可能一致，而有很大的變化，所以除了岩心分析所得的孔率外，還要借重各種電測解釋，計算孔率，然後以加灌平均法求得整個油氣田裏各層次之平均孔率。
5. 岩層裏的孔隙部份，有的互相連通，有的則否，連通者可自其中探出油氣，所以我們的興趣只在有互相連通的孔隙，因此我們把方程式（1—1）的孔率叫做絕對孔率（Absolute Porosity），而把互相連通在一起的孔隙大小叫做有效孔率（Effective Porosity）。

〔例題1—1〕某油層之面積為1,000,000平方公尺，油層厚度為10公尺，倘

孔率為0.2，問油層之孔隙體積為若干？

〔解〕：油層體積 $= 1,000,000 \times 10 = 10^7 \text{M}^3$

油層孔隙的體積 $= 10^7 \times 0.2 = 2 \times 10^6 \text{M}^3$

換言之，倘油層內無其他液體存在，則此孔隙體積為原始原油蘊藏之容積。

三、液體飽和度 (Fluid Saturations)

一般油層裏除了原油外，還有水存在，我們稱之謂原生水 (Interstitial 或 Connate Water)，此外也有游離的天然氣存在。

〔例題1—2〕假如有塊砂層的總體積是 100 立方公尺，其孔率是15%，則其孔隙體積為15立方公尺。如果這孔隙體積裏40%充滿了原生水，另60%充滿了原油，那麼原生水及原油所佔之體積分別為：

原生水： $0.4 \times 15 = 6$ 立方公尺

原 油： $0.6 \times 15 = 9$ 立方公尺

由上述例子，可以演譯出原生水及原油之飽和度的定義：

原生水的飽和度 (S_w) = $\frac{\text{水充滿的體積}}{\text{孔隙的總體積}} \dots\dots\dots (1-2)$

原油的飽和度 (S_o) = $\frac{\text{原油充滿的體積}}{\text{孔隙的總體積}} \dots\dots\dots (1-3)$

假如只有原油及原生水儲存於岩層之中，則原生水所佔之體積與原油所佔的體積之和等於孔隙總體積，則：

$$S_w + S_o = 1$$

一般油層，孔率減低則原生水的飽和度增加，亦即原油的飽和度減低。普通生產層的原生水飽和度約在0.1至0.5之間。

〔例題1—3〕應用例題 1—1 的資料，假設原生水的飽和度是 0.3，試問有多少體積供原油儲存？

〔解〕：孔隙的體積為 $2 \times 10^6 \text{M}^3$

原油所佔體積 $= 2 \times 10^6 \times (1 - S_w)$

$= 2 \times 10^6 \times (1 - 0.3)$

$= 1.4 \times 10^6 \text{M}^3$

如果油層裏有游離氣存在，則氣體的飽和度 (S_g) 可依下列求之

$S_g = \frac{\text{氣體充滿的體積}}{\text{孔隙的總體積}} \dots\dots\dots (1-4)$

$$\text{同時 } S_o + S_g + S_w = 1 \dots\dots\dots (1-5)$$

〔例題1—4〕應用例題1—1的資料，假如 $S_w = 0.3$

$S_g = 0.2$ 試問有多少體積供原油儲集？

$$\text{〔解〕 } S_o = 1 - S_w - S_g$$

$$= 1 - 0.3 - 0.2 = 0.5$$

$$\text{孔隙的體積} = 2 \times 10^6 \text{M}^3$$

$$\text{原油所佔體積} = 2 \times 10^6 \times 0.5$$

$$= 10^6 \text{M}^3$$

在應用液體飽和度時，下列三個因素必須注意：

1. 油氣層裏各處之液體飽和度均不相同，孔隙低的地方，原生水的飽和度趨大。同時氣、油及水因比重不同，自然形成氣在上，油在中，水在下的分離情形。所以原生水飽和度在構造低處要大，而在構造高處要小。

2. 油氣層裏，油及水之飽和度隨油氣生產數量而變化，原油自油層裏採出後，其原佔空間逐漸被游離氣及地層水所取代，所以油的飽和度就逐漸地變小。

3. 油及氣之飽和度常依碳氫物所充滿之孔隙而表示之，這是因為在討論相對滲透率時需要的，假如岩心的總體積為 V ，則孔隙的體積為 ϕV ，碳氫化合物充滿的孔隙體積應為：

$$S_o \phi V + S_g \phi V = (1 - S_w) \phi V$$

假如以 S_o' 及 S_g' 代表在碳氫化合物（烴）所充滿的孔隙體積中之油及氣之飽和度，則

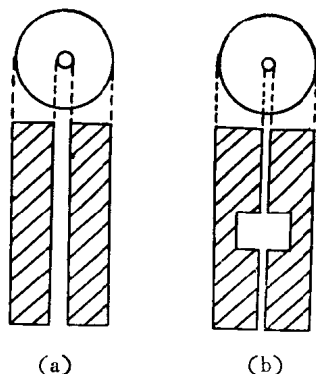
$$S_o' = \frac{S_o \phi V}{(1 - S_w) \phi V} = \frac{S_o}{1 - S_w} \dots\dots\dots (1-6)$$

$$S_g' = \frac{S_g \phi V}{(1 - S_w) \phi V} = \frac{S_g}{1 - S_w} \dots\dots\dots (1-7)$$

四、滲透率 (Permeability)

滲透率是用來表示流體在岩層裏流動的難易，所以它也和孔率一樣地是油層所具有的特性之一。換言之，滲透率是指示岩層中孔隙間的連通的程度。

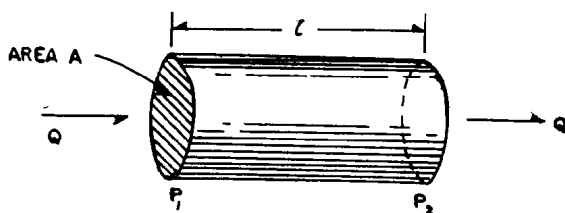
以第1—1圖之(a)及(b)兩樣本為例，(a)及(b)之孔率完全相同，但若以同樣液體其在(a)之流動要比在(b)者要容易要快，這是因為(b)樣本之通道較小而受毛細管作用之影響也。



第1—1圖 岩石之孔率相同而滲透率互異

亨利達西在1856年對水經濾砂之流動加以研究，而導出滲透率，係為滲透率研究工作的先驅。也因此石油工業界所用滲透率的單位叫做達西 (Darcy)，或簡寫為 d 。因為達西的單位太大，在實際應用上感到不便，所以又把一個達西的一千分之一稱為毫達西 (Millidarcy) 或簡寫為 md ，成為石油工業界常用的單位。一般油層之滲透率變化甚大，自1毫達西至1,000毫達西或更大。

滲透率的定義如下：假設一圓柱形有孔隙性之岩心，其截面積為 A ，長度為 l ，今將黏度為 μ 的液體充滿此岩心，然後將岩心置於管內，令管的內壁與岩心外壁間封塞完全，然後令同樣的液體自岩心之一端壓入，則液體自另一端流出（第1—2圖）。



第1—2圖 滲透率試驗圖解

進口端之壓力為 P_1 ，出口端之壓力為 P_2 ，每單位時間的流量為 Q ，依實驗，倘壓力差 $(P_1 - P_2)$ 增大， Q 增大；截面積 A 增大， Q 亦增大；長度 l 增長， Q 則減小；液體之黏度 μ 變大， Q 亦減少。從實驗得知：

$$Q\mu l / A(P_1 - P_2) = \text{常數}$$

只要在流量 Q 不發生亂流之範圍內，此常數，或稱 K ，與流體種類及壓力之變化無關，而為岩心本身獨有之特性，故

$$\frac{Q\mu l}{A(P_1 - P_2)} = K \dots\dots\dots (1-8)$$

方程式 (1-8) 即為達西方程式， K 即為岩心的滲透率。倘 Q 以立方厘米/秒， μ 以厘泊 (Centipoise)， l 以 厘米， A 以平方厘米， P_1 及 P_2 以大氣壓表示之， K 之單位即為達西，一個達西乘以 $\frac{1}{1,000}$ 即成毫達西。

至於達西與面積間之關係約為

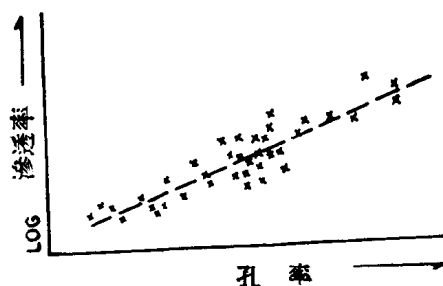
$$1 \text{ 達西} = 10^{-8} \text{ 平方厘米} = \frac{1}{10^8} \text{ 平方厘米} \dots\dots\dots (1-9)$$

或一億分之一平方厘米大小的面積約相當於一個達西。

一個油氣層中各處之滲透率均不一樣，而且可能變化甚大。岩心試驗時對於滲透率一項也不可能獲得十分精確的數字。大體來說，一個滲透率低於 50 毫達西的油層算是比較差的油層，滲透率在 50~250 毫達西之間者可算是普通好的油層，超過 250 毫達西應可算是很好的了。不過油井生產的良否，除與滲透率有關外，其餘的條件如水油比，氣油比及油砂是否易垮等問題，亦需予以考慮。

滲透率除了隨處而異外，既使在同一位置上，因受沉積環境及潮流的影響，所以在各個方向上所量的滲透率亦不會一樣。至於方程式 (1-8) 僅應用在層流（即在不發生亂流之範圍內）的情況下。普通一般石油在油層裏之流動情形，除接近井孔一公尺以內外，其餘的流動情形均為層流者。然若于氣井產率高者，氣體在氣層中之流動則不能保持層流流動。

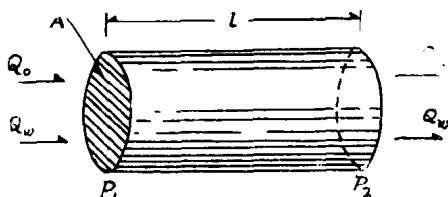
滲透率大小與孔率大小並無直接關係，不過以砂岩言，倘沉積環境相同，則孔率大者，一般其滲透率亦大，第 1—3 圖為若干油氣層孔率與滲透率之對比。



第 1—3 圖 孔率與滲透率一般對比

五、有效滲透率及相對滲透率 (Effective and Relative Permeabilities)

在第四節介紹的滲透率觀念，僅限於只有一種均勻的流體流經孔隙性的岩層。實際上很多油層裏至少含有原油及原生水兩種，如有游離氣存在則含有三種流體。假如油層裏含有原生水，因其堵塞一部份通道，所以原油在其間流動要較在同樣但沒有原生水的油層中難得多。



第1—4圖 有效滲透率試驗圖解

如第1—4圖，將岩心充滿水，然後以水及油之混合液通過岩心，每單位時間內之原油及水的流量保持一定分別為 Q_o 及 Q_w ，在剛開始的初期，進口端送進的是 (Q_o/Q_w) ，但出口端流出液體的油水比例則非 Q_o/Q_w ，俟流動一段時間而達到平衡狀態後，流出液體的油水比，才會達到 Q_o/Q_w 。在穩定之情況下，於達到平衡狀態前岩心的油及水飽和度，可自送入岩心及流出岩心之油及水的量來計算之。在流動穩定後，設進口端之壓力為 P_1 ，出口端之壓力為 P_2 ，則此時岩心對於油及水的滲透率可分別自下式求得：

$$K_o = \frac{\mu_o Q_o l}{A(P_1 - P_2)} \dots\dots\dots (1-10)$$

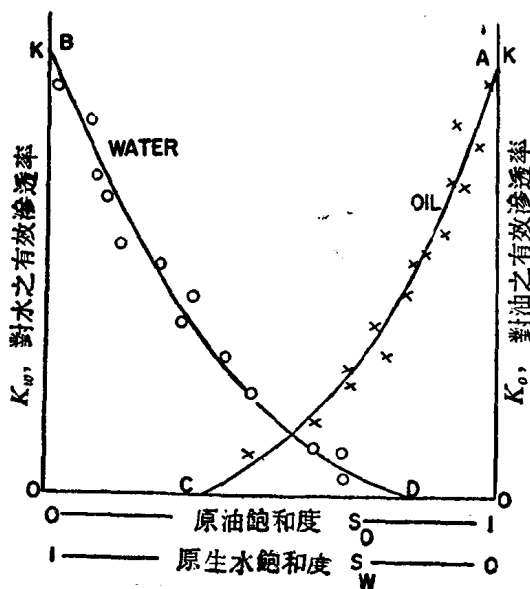
$$K_w = \frac{\mu_w Q_w l}{A(P_1 - P_2)} \dots\dots\dots (1-11)$$

式中， μ_o = 油的黏度， μ_w = 水的黏度

試驗時可變化原油的流量，但令 $Q_o + Q_w$ 不變，反覆試驗，然後自方程式 (1-10) 及 (1-11) 算出不同之 K_o 及 K_w 之值，並可與 S_o (或 S_w) 繪出如第1—5圖的關係。當 $S_w = 0$ ， $S_o = 1$ 時， K_o 即為岩心之滲透率 K ，同樣地當 $S_o = 0$ ， $S_w = 1$ 時， K_w 亦為 K 。

如果用同一岩石做試驗，只要保持層流之情況，不論變化原油之黏度，($Q_o + Q_w$) 之流量或 P_2 等，但 K_o 及 K_w 與流體飽和度所繪之曲線性質受原油黏度，流

量大小， P_2 ，岩心截面積及其長度等之影響比較小，而大致可以說其僅受岩心中流體飽和度之影響。



第1—5圖 油水系有效滲透率圖例

K_o 及 K_w 即分別所謂對油及對水之有效滲透率。我們在應用油水系之有效滲透率時，應注意下列三點：

1. S_w 自0增加時， K_o 值劇降； S_w 自1減低時， K_w 亦劇降。換言之，岩心裏含有一些水，就大大地增加原油流動的不易。反之亦然。

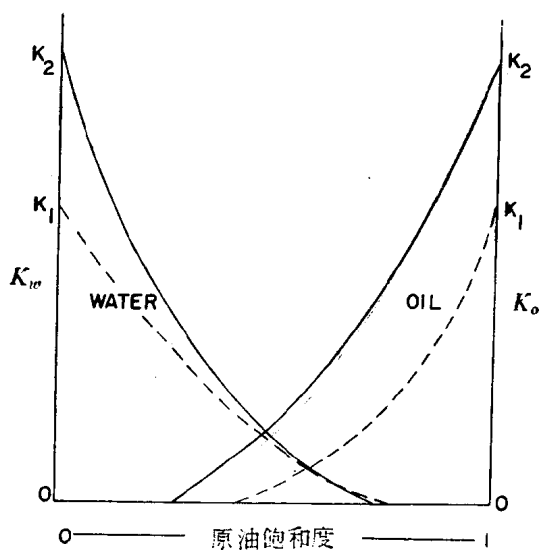
2. 即使岩心裏尚含有相當量原油的飽和度，但 K_o 已經降為零（第1—5圖之C點）。換言之，原油之飽和度小於某一最低飽和度時，石油在岩心裏就不再移動。這個最低飽和度也叫做殘餘原油飽和度（ S_{or} ），或叫做臨界原油飽和度（ S_{oc} ）。同樣對於水叫做殘餘水飽和度（ S_{wr} ），或叫做臨界水飽和度（ S_{wc} ）（第1—5圖之D點）。

3. 除了在第1—5圖之A及B兩點外，其餘 K_o 及 K_w 均小於K，實際上除了A及B兩點外，在任一飽和度下， K_o 及 K_w 之和常小於K即：

$$K_o + K_w \leq K \quad (1-12)$$

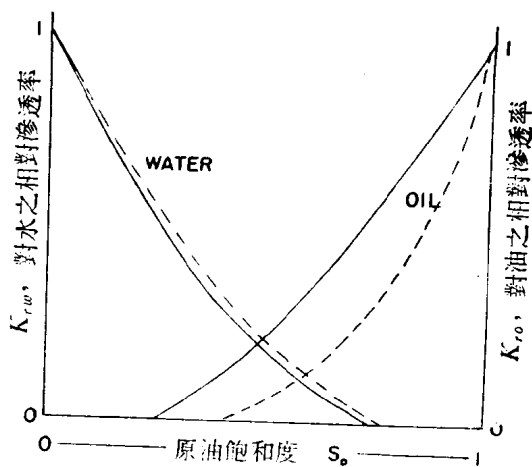
倘將二種液體分別以滲透率為 K_1 及 K_2 之二個岩心做試驗，可得第1—6圖所示之結果，因為 K_1 及 K_2 之起點不同，所以這些曲線均不足以比較二岩心對於

水及油之滲透率 (K_w, K_o) :



第1—6圖 二不同岩心之有效滲透率

假如這張圖略予變化，即以下列之滲透率比值重新繪為第1—7圖。



第1—7圖 二不同岩心之相對滲透率

$$K_{rw} = \frac{K_w}{K} \dots\dots\dots (1-13)$$

$$K_{ro} = \frac{K_o}{K} \dots\dots\dots (1-14)$$

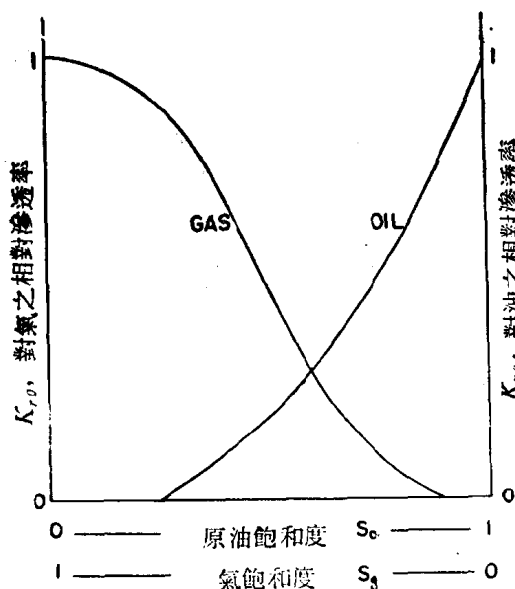
因爲這時 K_{rw} , K_{ro} 之曲線均自同一點開始，所以可以用以比較 K_{rw} 及 K_{ro} , K_{rw} 及 K_{ro} 之大小，即爲該岩心對於水及油的相對滲透率。且 K_{rw} 及 K_{ro} 之和均在 0 至 1 之間即

$$K_{ro} + K_{rw} \leq 1 \dots\dots\dots (1-15)$$

相對滲透率之曲線隨地層不同而有很大的變化，在油層研究時，某一地層之相對滲透率曲線應實際自試驗而獲之，如不能如此，也須從已有資料中選擇最接近的來做研究之用。

前述討論各點，僅爲油—水系的曲線，同樣地也可以獲得氣—油系及氣—水系的曲線，第 1—8 圖示氣—油系的一般相對滲透率曲線形狀。自氣—油系的相對滲透率曲線圖可獲下列諸要點：

1. S_o 自零增加， K_{ro} 亦急速減低，惟在 S_o 低時，一般對 K_{ro} 之影響不大。
2. 雖然亦有 S_{oc} 及 S_{gc} ，但 S_{oc} 在油氣系中與在油水系中之大小並不一致，即



第1—8圖 含油系相對滲透率圖例

令是用同一岩心做的試驗亦然。 S_{gc} 之大小通常在 5% 至 10% 之間。

3. K_{rg} 及 K_{ro} 之和常小於 1，即

$$K_{rg} + K_{ro} \leq 1 \dots\dots\dots (1-16)$$

4. 岩層的膠結程度好， K_{rg}/K_{ro} 比值亦趨增大，通常岩層之孔隙性及滲透性低者，在特定之氣飽和度下，其對於氣之相對滲透率要較其對於油之相對滲透率為高。

5. 上述油氣系之相對滲透率曲線圖中，未提到岩心裏所含的原生水問題，因為原生水一般均假定其不會移動，在油氣系之實驗時，均視其為岩石之一部份，所不同的只是減少岩心的有效孔率，這也是為什麼常常將油氣之飽和度以碳氫化合物（烴）所充滿之孔隙表示之。

不論相對滲透率或有效滲透率，試驗的技巧常常影響試驗的結果，其曲線的形狀一般雖不會出入太大，但是如果要用它來做量的計算，則難免有誤差發生。雖然有些學者企圖使用三種流體同時在岩心裏流動而獲得相對滲透率，但其精確度在目前的進展下，仍有商榷之處，不過試驗技術日新月異，電腦的應用，將來對於三相同時流動的相對滲透率曲線，或將廣被採用。

六、油氣層溫度

油氣層溫度，對於油氣在油氣層內的物理性質具有密切關係。油氣層的溫度可以自實際測量井溫而得，若能知道某一地區的地溫梯度，亦可自計算獲得之。

所謂地溫梯度係指地面溫度為某平均溫度時，地下的溫度隨深度變化的尺度，地溫梯度隨處而異，但任一油氣層之溫度因受地溫影響，自發現日起迄涸竭時止，溫度均不生變化，所以油氣層裏的一切變化，均在等溫條件下進行。地溫雖然隨地區而異，但平均在 $1^{\circ}\text{C}/100$ 呎或 $2^{\circ}\text{F}/100$ 呎，亦有高達 $4^{\circ}\text{F}/100$ 呎者，亦有低至 $0.5^{\circ}\text{F}/100$ 呎。假設某油田之地溫梯度為 $2^{\circ}\text{F}/100$ 呎，地面之平均溫度為 65°F 則在井深 5000 呎處之溫度約為：

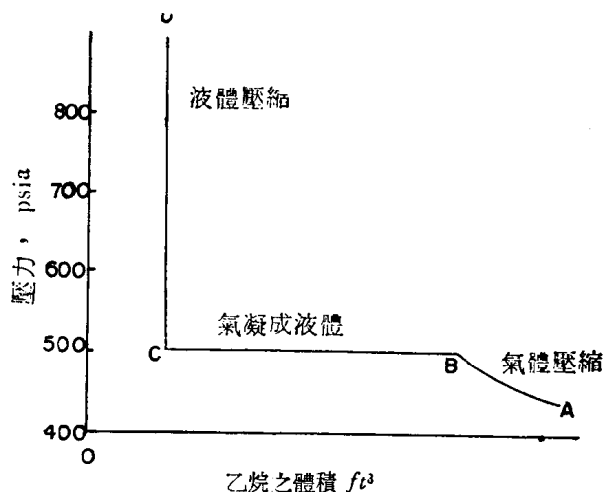
$$65 + 5000 \times \frac{2}{100} = 165^{\circ}\text{F}$$

七、烴類相態關係

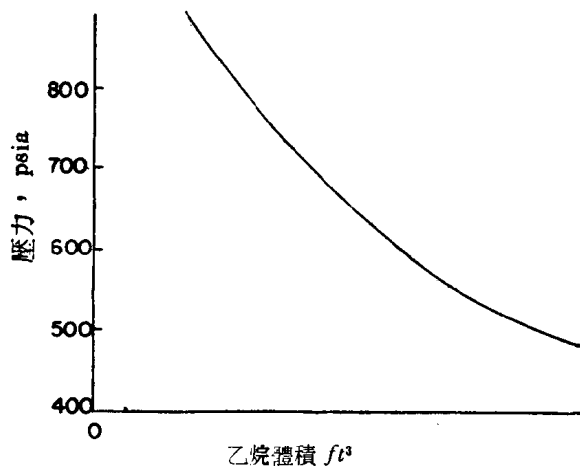
烴類之為液體，為氣體，或為液氣之混合物以及混合時油氣之成分甚至其體積之大小等性態，端賴其所處之溫度之高低及壓力之大小而異。

茲以乙烷 (C_2H_6) 為例，將乙烷置於圓筒之中，圓筒裏有一可移動之活塞，

圓筒內的壓力為 400 psia，溫度 60°F，此時乙烷為氣體。倘保持其溫度不變，慢慢加壓至壓力接近於 500psia 時，乙烷開始液化，此時繼續推動活塞而壓力仍不增加，乙烷亦繼續液化直至全部轉變為液體止，此時活塞再略予推動，壓力劇急上增，把這過程繪成曲線如第 1—9 圖所示。第 1—9 圖上 *B* 及 *C* 兩點顯示乙烷壓縮曲線的尖銳變化，*B* 點為乙烷開始液化，亦稱露點 (Dew Point)。 *C* 點為



第1—9圖 乙烷在60°F時之壓力與體積關係曲線



第1—10圖 乙烷在110°F時之壓力與體積關係曲線