

保存本

高等学校教学用书

采油工程

第一分册

石油院校教材编写组编

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校教学用书



采油工程

第一分册

石油院校教材编写组编

中国工业出版社

本書是石油高等院校“石油开采专业”和試行的“油田开发专业”的主要专业課教材。全書共分五篇，分四册出版。

第一分册包括緒論及开采石油的地质——物理基础。第二分册主要講述开采石油的基本方法。第三分册闡述有关油井分析与管理的問題。第四分册包括增产措施、修井工艺、注水、注气工艺和提高油层采收率等内容。

在第一分册中，对儲油岩层、油层流体的物理特性及油层中的分子表面現象作了比較全面的闡述。

本書由北京石油学院、西安石油学院及四川石油学院部分教师及研究生集体編写的。

本書也可供石油开采工程技术人員参考。

采 油 工 程

第 一 分 册

石油院校教材編写組編

*

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

(北京市書刊出版事业許可証出字第110号)

地质印刷厂印刷

新华書店科技发行所发行·各地新华書店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张6·插頁1·字数140,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数001—837·定价(10—6) 0.79元

統一書号: 15165 736 (石油—79)

前 言

采油工程是一門从油层出发，全面闡述油井开采工程的技术科学。全書共分五篇。本書为石油高等院校石油开采专业和試行的油田开发专业主要专业课程教材。

在学习本专业課程以前，應該学习“地下流体力学”、“油气田形成和分布”、“油气田勘探”和“油井工程”等先行課程，以掌握有关的专业基础知識和专业知識。学习了本門課程以后，还要学习“采油仪表与自动化”、“油田开发”和“石油工业經濟”等課程，所以凡是这些課程所要闡述的內容，本書即不再包括。

参加編写本書的有北京石油学院的教师 and 研究生王橄、韓大匡、洪世鐸、陈月明、成綏民、秦风山、王洪兴、张福臻、刘光汗、张朝琛、李昆三、胡靖邦、西安石油学院教师周春虎、四川石油学院教师彭克諤等同志，由韓大匡、周春虎两同志主編，北京石油学院采56級和采58級部分同学参加了部分編写和抄写繪图等工作。最后由北京石油学院采油教研室教师王橄、王鴻勛、张朝琛等同志进行校审。

由于政治思想水平、业务水平所限，時間短促，本書难免有不少缺点和不足之处，尙希讀者指正，以便修改补充。

編 者

1961年5月30日

目 录

前言

緒論 5

第一篇 开采石油的地质-物理基础

第一章 儲油岩层的物理性質

第1节 岩石的顆粒組成 12

第2节 岩石的孔隙性和渗透性 13

第3节 岩石的机械性质 16

第4节 粘土质岩石的膨胀 18

第二章 油层中流体和石蜡的物理性質

第1节 天然气的物理性质 19

第2节 地层油的相状态 28

第3节 地层油的物理性质 40

第4节 石蜡的物理性质 59

第5节 地层水的物理性质 65

第三章 油层中的分子表面現象

第1节 分子間力和表面能 73

第2节 表面张力和吸附作用 80

第3节 岩石表面性质及其和地层流体的相互作用 86

第4节 油层中的表面現象和毛細管效应 93

緒 論

一

石油开采是天然石油工业的一个重要組成部分。采油工作者的任务是：根据党的方針政策和严整的科学理論，运用先进的工艺設備和合理的劳动組織，多快好省地从油层中把原油采出来。具体地說，必須作到采油速度快，产量大；采收率高，天然資源得到最大限度的利用；产量波动小，高产时期长；人力物力财力的消耗少，經濟效率高；劳动条件輕便而安全，从而能最大限度地滿足国民經济对于石油日益增长的需要。

二

我国是世界上发现、开采和利用石油及天然气最早的国家之一。在一千八百余年以前，东汉时代班固“汉書”地理志中就有了在陝北延长一带发现石油的記載。而且勤劳智慧的中国人民很早就开始利用了石油及天然气。远在1600多年前，四川人民利用天然气熬盐。以后在历代的文史記載中可以看到，石油不仅用于照明及潤滑，而且还应用于軍事，医疗以及制墨等方面，和人民生活发生了密切的联系。

由于我国人民很早开始了地下盐水的开采，并大量地应用天然气熬盐，这样就大大促进了鑽采技术的发展。早在2200多年前，秦代卓越的工程学家李冰开始鑽凿盐井。到1600多年以前，在四川鑽凿盐井时遇到了天然气，有所謂“邛州火井”的記載，这是世界上第一口天然气井。公元1521年明朝时代，在鑽凿盐井时又遇到了石油。接着，在該地区还鑽了很多井。到1840年我国鑽井深度已經达到1000米以上。而以世界石油工业創始者自居的美国，在1859年才鑽成第一口深度为21.69米的油井。

不仅如此，根据記載，在三百多年以前，我們的祖先已經掌握了根据地质情况定井位，下导管，处理鑽井事故以及堵漏，防斜，防塌等一整套最初的鑽井工艺技术。采气的規模也日益扩大，到1840年日产几万立方米的气井，已达10口，在100余年前，鑽井，采气和制盐的手工业作坊已有几十万人的規模，而且有严密的組織和細致的分工。

这些事实証明了我国不仅是发现和利用石油和天然气最早的国家之一，而且在鑽采技术方面，早年也远远走在資本主义各国的前面。

从世界各国采油工艺技术的发展情况看来，在石油工业发展的初期，一般油井的深度比較浅，对于压力高的油层，就讓它毫无控制的自噴，能量消耗后再用提捞法进行开采。后来才慢慢掌握了有控制的自噴开采技术。对于压力小的油层，由提捞法也逐漸发展而用深井泵开采以及气举采油等采油技术。随着科学技术的发展，人們慢慢从地面設備的管理深入到对油层的研究。油矿地质科学的发展和油层物理学、地下流体力学的建立，逐漸为油田的合理开发和开采奠定了比較严整的理論基础和科学根据。同时，还逐漸从个别油井的管理发展到整个油田的开发，并广泛采用了注水、注气等保持压力的先进开发油田的方法；对能量已受損耗的油田进行二次采油，这样大大提高了油田的采收率。与此同时，在采油技术方面也日益完善，近年出現并逐步推广了电动沉沒泵、长冲程液压抽油机等等新型采油設備；广泛应用了大型的压裂、酸化等先进的增产措施；完善了各种試井仪表的設

計和制造，創造了各種新型的試井方法；改進了各種與油井的砂、腊、水三害作鬥爭的技術措施和修井工藝，發展了多油層油田的開采工藝。最近，自動化技術的進一步發展，又為采油技術的發展开辟了新的方向。目前，國內外的石油工作者正在試驗和研究注入水中添加表面活性劑、互溶混相驅和火燒油層等新方法，以期進一步提高油田的采收率。

但是，石油工業能否迅速發展，取決於社會的制度。由於我國長期處於封建社會，殘酷的封建剝削加上近百年來帝國主義國家的侵略和掠奪，致使我國具有光輝歷史的石油和天然氣工業，在解放以前卻已陷於奄奄一息的悲慘境地，一個六億多人口的国家，僅有油田四處、氣田二處，最高年產量（1943年）連同人造石油在內僅32.1萬噸，天然石油更為可憐，最高年產量（1948年）僅8.1萬噸。而從1907年到1948年，前後42年累積產油量僅278萬噸。不但如此，連這樣幾個油田，也都沒有得到合理的開發。

解放後，由於黨和政府的正確領導，蘇聯和其他兄弟國家的大力援助，我國石油工業就開始獲得了新的生命。特別是自從1958年以來的三年大躍進中，在社會主義建設總路綫的光輝照耀下，廣大職工充分發揮了敢想敢干的共產主義風格，把沖天的革命干劲和科學分析精神相結合，石油產量連年持續大躍進，采油工藝技術也迅速提高。石油年產量從1949年至1959年十年內共增加了30倍以上。我國的石油工作者在1954年對老君廟油田編制了我國第一個注水方案，1955年起就在該油田進行了注水，逐步掌握了注水的工藝和技術。在采油工藝方面，掌握了大型壓裂、大型酸化等先進增產措施；發展了與砂、腊、水作鬥爭的各項技術措施；改進了密閉輸油流程，開始研究和應用了油井管理自動化，遙控化以及其他新技術；並着手研究各種提高采收率的新方法，特別應該指出的是，三年大躍進以來，根據我國的實際情況，創造了一套在技術上大搞群眾運動的經驗和生產組織工作的經驗。如油礦地質工作中的群眾性大辦地質、大搞地層對比和搞清油田地質情況的群眾運動，油井管理中群眾性油井分析運動，修井工作中的群眾性修井運動以及油井完成中的“五隊合一”的經驗，采油工作中的以采油隊為“龍頭”的“七隊合一”的經驗等。

目前，我國石油工業雖然還是國民經濟中薄弱的一環，但是我們深信，在黨和毛主席的領導下，在三面紅旗的光輝照耀下，我國的石油工業將迅速地成長壯大，成為一個強大的工業部門。

三

石油蘊藏在地下深處的儲油層中。一般在油層的含油區周圍，分布着廣大的含水区，當有氣頂時，則還有含氣區。由這些區域所構成的、而以含油區為主體的、統一的水力系統，我們稱之為油層系統。在自然條件下，油層系統千差萬別，相當複雜，它的構造類型、大小、厚度、所含油、氣、水的性質，以及所儲存能量的類型和大小等都是極不相同的。人們要把石油從油層中采出，必須通過深達數百米甚至數千米的油井。一個油田的開發與開采，就要根據油田的具體地質條件，在整個含油面積上，以一定的形式布置一定數量的油井，並且使它們按一定的工作方式來生產。同時，為了更快更好地開發油田，還往往通過各種注入井用注水、注氣等方法向地層中添加人工的能量。這些注入井同樣必須根據具體地質條件的不同，以一定數量形式和工作方式作用於油層。人們正是通過這些油井和注入井來控制油層的生產，達到高速度高水平地采出石油的目的。這個系統，可簡稱為油井系統。一切油田的開發和開采都離不開油層系統和油井系統兩個方面。這兩個系統所

組成的統一的整体称为油层-油井系統。油层系統和油井系統相互連系和相互作用的过程，就是油田开发和开采的过程。

由此看来，把地下的石油最有效地采到地面，必須經過两个过程：第一，是如何使儲藏在岩石孔隙中的石油，沿着油层复杂的孔隙网最有效地流入井中；第二，則是如何使流入井底的石油沿着油井，最有效地流到地面。这两个过程也相互联系、相互影响不可分割。对于前一过程的研究，着重于油层，主要的任务是解决合理开发一个油田的問題。而对于后一过程的研究，着重于各个油井，主要的任务是合理地开采油井的問題。虽然着重点不同，但是，这两个任务却密切相关；因为油井是油层的出口，是人們用以控制油藏生产的一种手段，油井开采得不好，必然影响整个油藏的开发；反之，如果整个油藏情况恶化，那末个别的油井也就很难正常生产。因此决不能机械地把两个过程、两个任务截然分开，它們是一个完整系統的两个組成部分。要合理地开发一个油藏，必須建立在管好每一口油井的基础上，另一方面，要管好油井，也必須从整个油藏的情况着眼。

但是，也必須看到，这两个过程毕竟是不同的，有它各自独特的規律。前一过程是原油在岩石的孔隙网中向井底渗流的过程，所以要研究这一过程的客观規律，必須要研究和掌握油层的变化規律以及地下流体在孔隙中的运动的規律。这也正是“地下流体力学”和“油田开发”等課程的所要闡述的問題。后一过程則主要是依靠油层自身的能量，使混气液体（有时还有固体，如砂蜡等等）从油管內上升的过程（自噴过程）；或者是人为地通过各种方式向井內补充能量，借以将液流举升到地面的过程（即机械采油法）。研究和闡述这第二个过程，則是本課程的任务。

在油田开采工艺方面，由于每一个油田和油层都有它的特殊性，世界上油田虽多，但到目前为止，只有比較类似的油田，还找不到两个完全相同的油田，至于油层的情况則更是千变万化，十分复杂的。这样，非但决定了整个油藏的开发上所采取的工艺措施的特点，而且也决定了在油井的开采和管理上的特点。例如油层的厚薄和层数、油层的物理性质、原油性质等的不同，油井的开采工艺和措施也就大不相同。所以，在开采油井时必须通过一切方法来掌握具体油田或油层的特殊規律，把油层的情况搞得清清楚楚，以作为采取合理工艺措施的客观依据和出发点。一切都要从油层的实际情况出发，是采油工作中一条重要的原則。

研究油层又必須通过油井，因为油藏深埋在地下，既看不見也摸不着，要研究和掌握某一具体油层的原始天然状态和变化的动态，必須通过實驗室的各种岩心分析，地球物理测井、矿場試井以及油井的动态分析等种种調查研究的方法。因为只有情况明，才能决心大，方法对。而这些工作却都要通过油井才能进行。这些工作也是采油工作的一个重要組成部分。

要做好采油工作，使油井能够正常的稳定的生产，經常保持比較高的产量，还必须經常分析油井的变化动态，采取各种必要的措施，做好油井管理工作。采油工作中一切工序，其最終目的都是为了更多更快更好更省地从油层和油井中采出石油，所以，可以說油井管理工作是采油工作的中心环节。进而，在同一个油田里，往往很少有二口情况相同的油井，所以对个别的油井必須采取“具体問題具体分析区别对待”的原則，才能“对症下药”，及时采取有效措施。所以油井分析又是管好油井的主要手段。

要做好采油工作，必須防止各种事故的发生，防止砂、蜡、水等对油井正常生产的危害。“防患于未然”是油井正常生产的主要保証。但是，一旦发生了事故和危害，就必须及时采取措施来加以修理。根据油层的复杂性，以及油井生产条件的特殊性，油井的修理工作也是一

項十分繁重的工作。多年来的实践证明，油田生产的开始也就是維修工作的开始。所以对待这些影响油井正常生产的任何危害，都必须根据防治結合，以防为主的精神来具体处理。

不仅如此，要做好采油工作，还必须更积极地采取压裂、酸化等措施，进一步增加油井的产量，这是現代采油技术发展的一个重要方向。

要做好采油工作，除了上述直接与油井有关的工作以外，还必须做好注入井的管理工作，以保持油层有足够的压力，并进一步提高油层的采收率。因为油藏的能量是否充分，压力有无下降，是合理开发油藏的一个根本問題。所以从采油工艺方面來說，必须确保注入井的正常工作，并且要千方百計地进一步提高它們的注入量。

总括上述，采油工作的技术方面主要是“管、修、注”三者相結合，而又以油井管理为中心环节。

另一方面，要搞好这些采油技术工作，最重要的是必须做好人的工作。从上述可以看出，在整个油井油层系統中，油层系統是自然界的客观存在，是采油工作的对象，而油井系統却是人們为了了解油层，控制油层，从油层中采出石油所用的一个手段，所以在人、油井、油层三者的关系中，人是主导的、决定性的因素。任何采油工作，离开了人的主观能动性，是根本不可能做好的。所以必须在采油工作中加强党的领导，政治挂帅，贯彻党的各項方针政策，加强政治思想工作，大搞群众运动，发揚政治、生产技术和經濟三大民主，贯彻两参一改三結合的管理制度，加强企业管理工作和各項組織工作等等。总之，技术与政治必须密切結合，技术工作要以政治为灵魂，而政治工作又要渗透到技术工作中。

四

“采油工程”是根据党的方针政策，从油层总体情况出发，講述油井开采的科学原理，工艺設備以及部分生产組織問題的技术科学。

本書共分五篇：在第一篇首先闡明关于油层的全面概念；在第二篇着重于采油的各种基本方法，基本原理和基本过程的介紹；第三、四、五篇則按照管、修、注三者結合的精神，分別叙述油井分析与管理，增产措施与修井工艺，以及注水、注气和其他提高采收率的新方法等問題，而以油井分析与管理一篇为主体。

在叙述每一个具体工艺过程或技术措施的时候，力求贯彻理論与实际結合的精神，尽量做到既把基本理論講清楚，又有較丰富的实际資料和具体的工艺措施；并且根据“采油工作者的崗位在地下，一切采油工作要从地层出发”的原則，力求分析清楚应用各种具体工艺技术的具体地层条件。同时，闡述了与我国油田特点有关的一些采油技术問題，例如含蜡井的开采、多油层的开采等。此外，在叙述各种类型油井管理时，根据“防治結合，以防为主”的精神安排各章的具体內容。

采油工程是一門技术科学，所以学习上必须贯彻理論与实际結合的精神，既要弄清各个工艺过程的基本理論，又要掌握各項具体工艺措施的条件，程序和方法。这样在工作中才能举一反三，灵活应用。

在学习中，还必须參閱其他有关参考書及期刊，进一步丰富自己的理論知識。更重要的是要通过专业生产劳动，科学研究及現場教学，虛心地学习工人的丰富实际經驗，力求通过亲身的实践，取得直接的經驗，真正牢固地掌握这門科学，为祖国石油工业的发展貢獻更大的力量。

第一篇 开采石油的地质—物理基础

第一章 储油岩层的物理性质

我們知道，一个油田的大小可由几平方公里到几千平方公里。例如加拿大的別門毕拉油田，其面积达3,070平方公里。象这样油田，就世界范围来講还不是个别的。

所謂油田，一般是指在同一地质构造內，由具有不渗透的盖层和底层并为底水或边水所封閉，包括底水或边水在內的儲油岩层的总体而言。而这种包括底水或边水在內的儲油岩层就是通常所謂“油层”。

一个油田可能有几个油层，特别是大油田。只有一个油层的油田看来是少見的。例如苏联的羅馬什金油田就有五个油层。

另外，油层內的含油气部分叫作油藏。

于是可以知道，一个油田可能只有一个油层，也可能有几个油层。而一个油层可能是就只包括一个油藏，但也可能是几个油藏同屬于一个油层。多油层（或多油藏）的油田，可以同时开采亦可以按次序分别开采。

图 1—1 所示为一个油田的儲油岩层剖面。从图上可以看出，它包括很多个油层和油藏。

同一个油田构造中除油层以外，有时也还可能有純气层，或純水层。它們可能位于油层以上或以下；也可能位于油层和油层之間；油层、气层和水层之間。这种情况是极为复杂的。

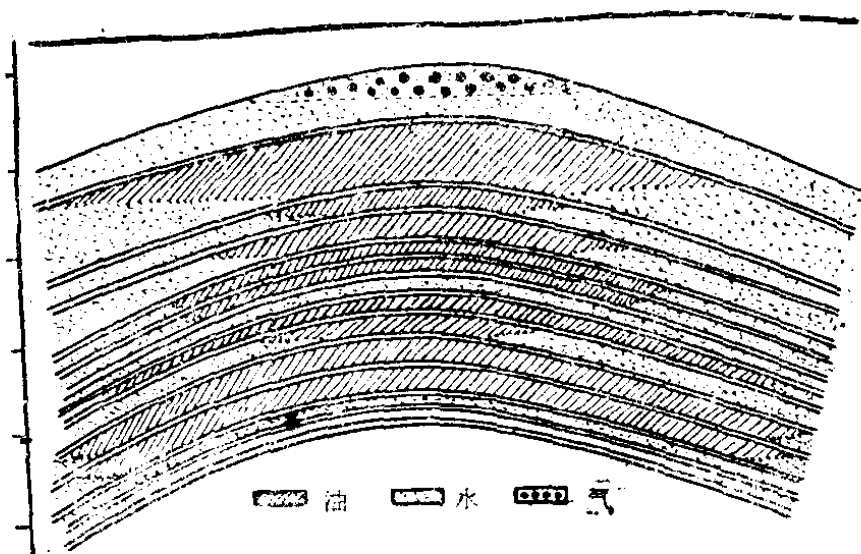


图 1—1 油田儲油岩层剖面

統系	層	特征	厚度
生 產 層	IX		
	X		30%
	XI		25%
	XII		

图 1—2 油层剖面

應該指出，即便是同一油层，中間仍可能有各种不同的夹层，从而又将同一油层分成若干小层。这一点从图1—2所示的油层剖面可以看得很清楚。

从图上不难看出，組成油层剖面的岩石是各种各样的。通常，儲油岩石多为渗透性較

好的砂层和砂岩。和儲油砂岩在一起的，往往还有不渗透的和渗透性不好的中間夹层。一般，不渗透层多为粘土层、泥岩层和頁岩层等。渗透性不好的，大都是致密的砂岩层。它們可能是泥质砂岩，也可能是灰质砂岩。

除了上述不渗透和渗透性不好的夹层以外，在含油层剖面上，还可能有具有渗透性的水层、气层，甚至“漏层”。漏层是由具有裂隙的砂岩和具有裂隙或溶洞的石灰岩层形成的。也有时是砾石层。

另外我們知道，一个油田以至一个油层的岩层剖面的岩石性质的复杂性，不仅在于它可能由各种不同的岩石所組成；而且同一种岩石，性质也通常是很不均一的，这就是所謂岩性的不均一性。

就一个油田或一个油层的整个横向剖面来看，岩相和岩性沿横向剖面上的变化也是复杂的，表现为：不同岩层的厚度不同；岩相的变化；岩性的不均一性；同一岩层由于断层而錯开；岩层的尖灭；岩层中間夹有不同性质的結核等。

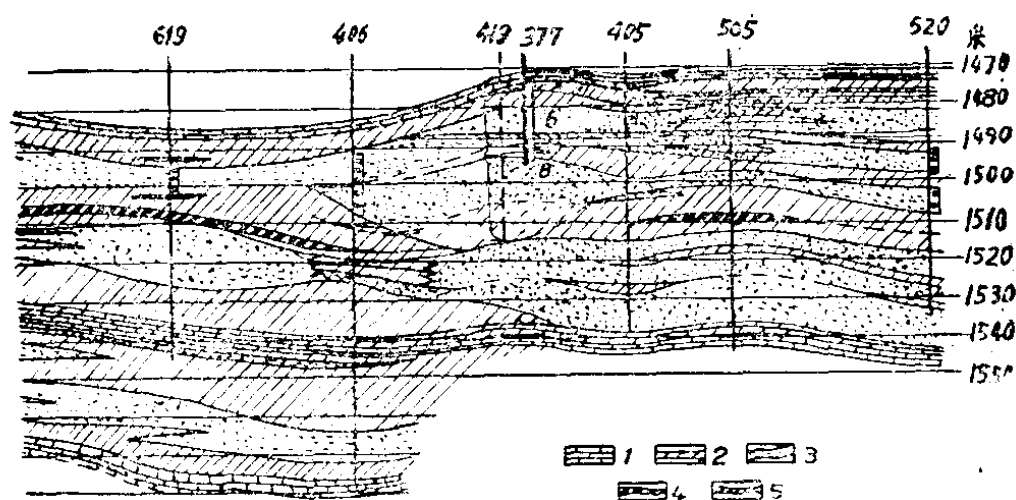


图 1—3 油田横向剖面油层厚度和岩相岩性变化
1—石灰岩；2—粘土；3—砂岩；4—黑色石灰岩；
5—砂岩的被冲洗部分。

就油层厚度来講，一个油田的不同油层，其厚度固然可能不同，然而同一油层的厚度，往往也有很大的变化，（由几米到几百米）。例如有的油田，其油层总厚度达106—335米。厚度大的油层，有的比較均匀，但常常在油层中間有非儲油的夹层存在。有时这种夹层很多，而把油层細分成很多很薄的小分层，其层数可能达到数十层以至数百层。厚度比較小的，也可能有夹层。因此，

被夹层所分割的一些分层，有的厚度尚不及1米。

就油田横向剖面的岩相和岩性变化来講，有的可能由渗透性較好的砂岩，逐步轉变成渗透性較差的，有时甚至可能轉变成不渗透的如泥岩。有时有的也可能逐漸尖灭掉，也有的可能为断层所断掉。图1—3可作为这方面的一个例子。

就油层剖面岩石的物理性质来講，应该指出，采油工作所涉及到的岩石性质是多方面的，如岩石的孔隙性和渗透性，饱和液体性质和机械力学性质等。而且在考虑到每一性质的同时，应联想到这种性质的不均一性和岩石結構的复杂性。

上面我們只是就一个油田的儲油岩层及其周围岩层的岩石剖面作了个簡單概述，目的在于对儲油岩层有个比較概括的了解。

至于油层的概念，还应考虑到上述儲油岩层中所包含的石油、天然气和地层水。油层中天然气一般总是溶解于石油中，有时也以游离状态存在于儲油层的頂部，构成所謂“气頂”；石油居中，地层水一般处在油层的底部或边部，即“底水”或“边水”。油层中的油气水总是儲存有一定的能量，亦即油层中的油气水通常总是处在一定的油层压力之下。

油层压力一般可以認為是相当于油层深度的靜水压头的压力：

$$P_{\text{油层}} = \frac{H}{10}$$

式中 H ——油层深度，米。

但是由于地质情况和影响因素比较复杂，上述油层压力的计算只能作为一般估计用。因此，准确的压力值必须靠专门的井下压力计来测得。例如苏联北高加索的一个油田，其油层深度为2,356米，却有高达350大气压的油层压力。

油层温度一般高于地表的温度。它和油层压力一样，也是随油层深度的增加而增高。通常可以用每一个地区的“地温梯度”和“地温级度”来粗略地估算一下油层温度。

从地表每向下加深1米其温度的增加值叫做“地温梯度”。

从地表向地下，温度每增加 1°C 所增加的深度叫做“地温级度”。

由于地下水、气候等等因素，各地区的“地温梯度”是不同的。例如玉门地区的地温级度为26米/ $^{\circ}\text{C}$ 。

油层温度主要靠井下温度计来测得。

由于储油层岩石（砂岩）中孔隙大小的不均一性，油层中的油水接触面以至油气接触面看来不是“镜面”。亦即油水或油气接触面不是一个截然分开的油水分介面，而是一个油水过渡带。如图1—4。

至此，可以说对于一个油层才算有了个比较概括的了解。

我们知道，石油被采至地面一定要通过油井。而井底周围的储油岩层就相当于采油井的大门。很多的采油工作都将直接和井底岩层有关系，例如油井完成井底结构的确定。如果油层虽比较厚，但粘土夹层多或夹层为水层或岩层疏松易垮时，显然只有选择射孔完成的井底结构。又如油井增产措施的选择，一般讲油井酸化比压裂成本要高的很多，只有井底储油岩石碳酸盐含量比

较高时，采取酸化措施才可能取得较好的增产效果，从而在经济上才合算。再如油井的出砂出水和井底的坍塌易垮以及漏失等都和井底岩层有关系，而修井措施的确定亦必须考虑到储油岩层的具体情况。

至于油井的经常管理分析上，更应随时考虑到井底油层情况的变化。因为石油每时每刻都在流经井底岩层，如果管理不当便可能造成有关井底岩层上的事故。由此可见，把这一“油井大门”是何等重要。因此在采油以前油井完成时，力图尽早地就能有一个较好的“油井大门”对采油工作来讲是极其重要的。我们知道，一口井一般要工作十几年，因此，必须为长远考虑问题。所谓较好的“油井大门”，一般应该是：油层渗透性好，有足够的强度和裸露面应该尽量大。近年在采油上所采取的“人工井壁”的措施，目的即在于此。

有时在油井分析上，还需要考虑到周围几口井和某一个区域的生产情况，这样，对油层的了解就不应只限于井身油层纵剖面，还应对一个区域的油层横向剖面的岩性岩相变化以及油层整个情况有所了解。

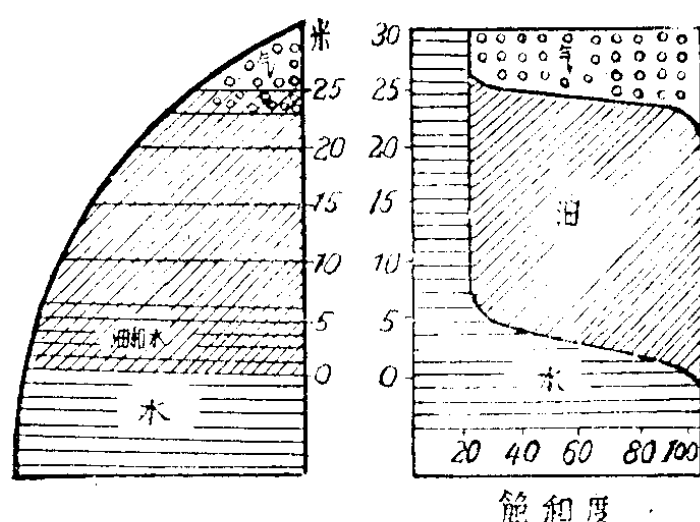


图 1—4 油层中油水气分布示意图

另外，我們知道，儲油層岩石是石油在地下儲藏和流動的客觀環境。因此它必將直接影響石油在油層中的流動和油層的石油采收率問題。從這個意義上講，細致地了解儲油層岩石的物理性質就更為重要了。但是，因有關這方面的內容在地下水力學中已講過。所以下面僅就與采油有關的儲油層岩石的一些物理性質的概念作一簡述。

第1節 岩石的顆粒組成

我們知道，儲油岩石主要是沉積岩，一般都是砂岩。石灰岩和白云岩等亦不在少數。

砂岩通常是由性質不同，形狀各異、大小不等的砂子顆粒和各種不同的膠結物所組成。砂岩顆粒的礦物組成大多為石英、長石類和雲母類等礦物，其中主要是石英。一般石英顆粒比由長石類所組成的顆粒，其圓度較好。雲母則是片狀的。

一般儲油砂岩的顆粒大小約在1—0.01毫米之間。組成砂岩的顆粒大小可由圖1—5和圖1—6所示的篩析曲線來了解。圖1—5的縱座標為顆粒的重量百分數。圖1—6的縱座標為顆粒重的累積重量百分數，後者表示的是小於某篩網尺寸的顆粒的總的重量百分數。亦即凡是小於某篩網尺寸以下的各個篩網的顆粒重量百分數之和。而前者（圖1—5）只是某一個篩網中的顆粒重量百分數。

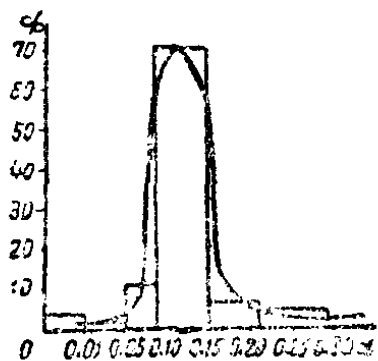


圖 1—5 顆粒組成分布曲線

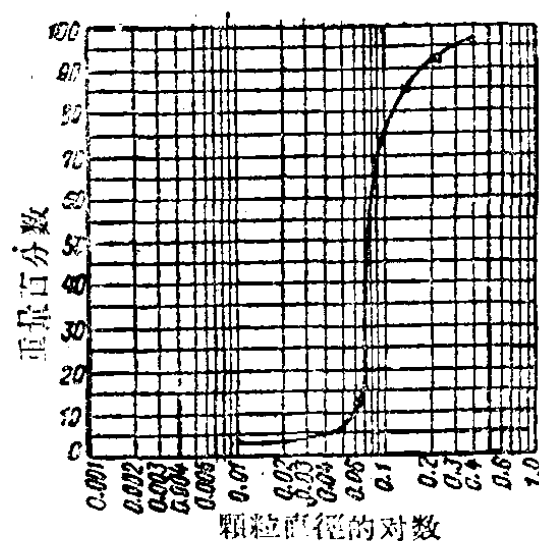


圖 1—6 顆粒組成曲線

砂岩中的膠結物一般主要是粘土和碳酸鹽以及矽質等。這類粘土膠結、碳酸鹽膠結和矽質膠結，通常叫作原生膠結。亦即膠結物與岩石顆粒在沉積過程中同時生成。這種膠結物大多都具有較大的機械強度。但是它們通常可以用鹽酸和土酸將其破壞。

油井酸化增產措施的地質依據主要是取決油層岩石的碳酸鹽含量，其大小可用試驗方法直接測得。

還有所謂次生膠結。亦即膠結過程在成岩以後。例如地層水溶液流經岩石孔隙從中所沉析出的膠結物。通常電介質鹽類和水溶性膠體的一些膠結物多屬於這一類。

一般由於其膠結型式不同，其膠結強度亦為之不同。

膠結物的數量遠大於顆粒數量，顆粒完全浸沒於膠結物中，稱為基底膠結。這種膠結的膠結物往往還很複雜。它的膠結強度很高。

僅在顆粒接觸的地方才有數量不多的膠結物的稱為接觸膠結。膠結作用不結實。

另外還有所謂充填膠結。膠結物充填於經接觸膠結起來的顆粒的孔隙之間。它加強了接觸膠結的強度。

还有一种所谓溶蚀胶结。胶结物伸入颗粒深处，经溶解或置换后再行胶结。胶结强度很大。

总之根据胶结强度的不同，砂岩一般可分为：强胶结；胶结和松散胶结三种。

松散胶结的砂岩，一般手力即可将其破坏成其原来的颗粒组成。

胶结砂岩中胶结程度较轻的只要用研钵就可将其破坏成其原来的颗粒组成，经一般的物理和化学方法也就可能将其破坏。胶结程度较重的亦即强胶结岩石。一般很难将其破坏成其原来的颗粒组成。纯粹由不胶结的砂子所形成的储油岩层是十分罕见的，一般或多或少都经过一定的胶结。

采油中如油井出砂以及清砂和防砂等，都直接和储油岩层的颗粒组成和胶结情况有关系。又如油井增产措施——酸化、压裂的确定和研究也和它有关系。

另外，它和储油岩层的其他物理性质，如岩石的孔隙性、渗透性以及岩石的机械力学性质等也都有关系。

第2节 岩石的孔隙性和渗透性

砂岩颗粒和颗粒之间未为胶结物所充填的地方就形成孔隙。其孔隙通道不只是上下，左右，前后，而且是到处畅通，四通八达的。砂岩由于其颗粒大小不等，形状各异，再经各种错综复杂的胶结，不难设想其孔隙通道的复杂性。我们可从图1—7所示之砂岩磨片在显微镜下的照片来看一下砂岩孔隙断面结构。照片中黑色部分为孔隙空间断面，白色为颗粒断面，有点的为胶结物。



图 1—7, I 粗粒复矿砂层显微镜下的孔隙结构照片
黑色—孔隙空间；点—胶结物。

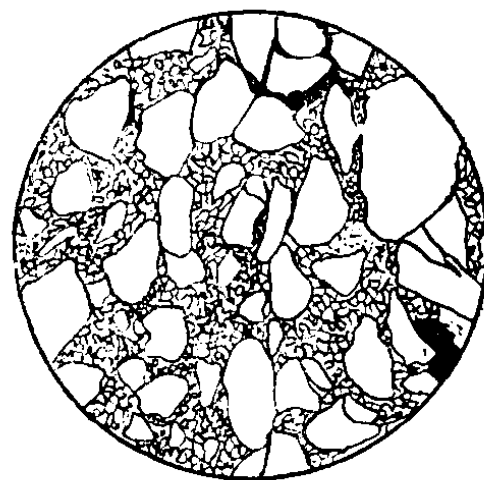


图 1—7, II 中粒石英砂岩显微镜下的孔隙结构照片（胶结物为石灰质）
黑色—孔隙空间；点—胶结物。

从照片上所看出的砂岩孔隙断面，不难理解实际砂岩的孔隙通道，其复杂性不只在于孔隙大小不均，交错复杂，还在于有的孔隙可能为胶结物所堵死而形成与周围互不连通的死孔隙。因此可以说，砂岩的孔隙通道实为错综复杂的“孔隙网”。

由于天然岩石“孔隙网”通道的过于复杂，为了便于研究，一般简化地看成不同大小的毛细管孔道。

这种毛细管孔道的大小，一般人为地分成为：

- (1) 超毛细管孔道。其直径大于0.5毫米；
- (2) 毛细管孔道。其直径在0.5—0.0002毫米之间；

(3) 微毛细管孔道。其直径小于0.0002毫米。

液体在超毛细管孔道中流动时，一般遵循管流规律。而液体在毛细管孔道中流动时，应遵循毛细管规律，亦即流动将受到“毛细管附加压力”所制约。根据普通物理学所讲过的，毛细管附加压力 $P_{附加}$ 可表示如下：

$$P_{附加} = \frac{2\sigma}{r}$$

从式中可看出，当毛细管直径愈小时，附加压力则愈大。式中 σ 为毛细管中液体的表面张力， r 为毛细管半径。

液体在微毛细管孔道中，在自然条件下，实际上它并不能参与流动。

砂岩中不同大小的毛细管孔道的分布情况，可以通过测定液体表面张力 σ 和液体在不同大小毛细管孔道中所呈现出不同的附加压力来求得。

砂岩中孔道大小的分布情况，可以图1—8和图1—9所示之测定结果为例。

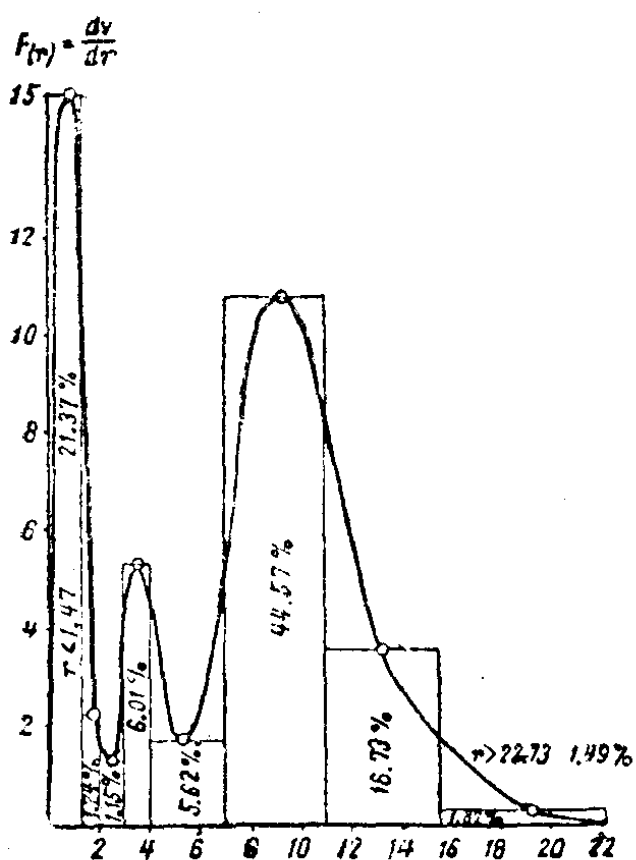


图 1—8 砂岩孔道大小分布曲线

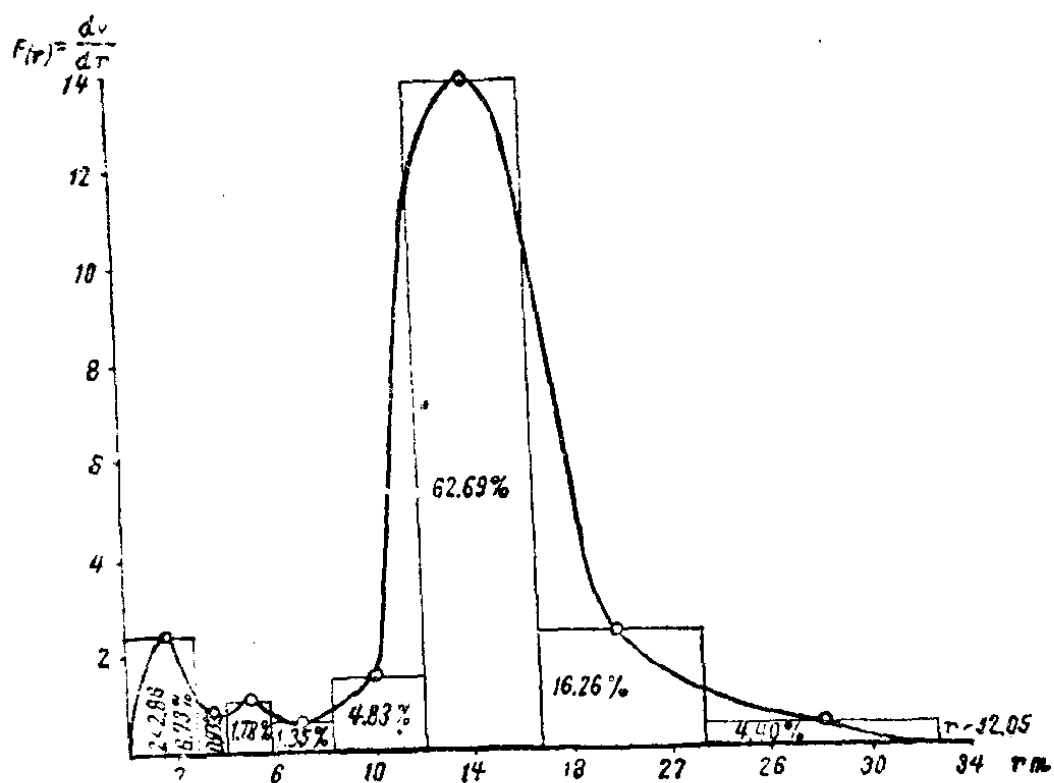


图 1—9 砂岩孔道大小分布曲线

图上方框内的百分数表示半径大小在一定范围的孔道在试样中所占的百分数。百分数最大的孔道半径（例如图1—9中占62.69%的孔道其半径为12—16.5微米），它将反映出试样（岩石）渗透性的好坏。

岩石中占百分数最多的孔道半径（或直径）愈大，该岩石的渗透性愈好。例如图1—9所示的试样一定比图1—8所示的试样渗透性要好。因为图1—9占62.69%的孔道半径平均为14.3微米，而图1—8占44.57%的孔道半径平均为9微米。前者不只孔道半径远大于后者，其所占的百分数亦远大于后者。试验证明，前者渗透性比后者大5倍。

岩石中孔道大小所占百分数最多者，例如上述两个试样的14.3微米和9微米，实质上反映了各该岩石平均孔道大小（半径）。

岩石中平均孔道大小亦可近似地用下式进行计算：

$$r = \frac{2}{7 \times 10^3} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

式中 r ——孔道半径，厘米；
 K ——岩石的渗透率，达西；
 m ——岩石的孔隙率。

为了便于对比各种岩石的孔隙的大小，岩石中孔隙体积的大小，一般用单位体积的岩石内孔隙体积所占的百分数来表示。通常称它为岩石的孔隙度。它可以下式表示：

$$m = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{岩石}}} \times 100$$

式中 m ——岩石的孔隙度，%；
 $V_{\text{孔隙}}$ ——岩石中的孔隙体积；
 $V_{\text{岩石}}$ ——岩石的几何体积。

式中当 $V_{\text{孔隙}} = V_{\text{岩石}} - V_{\text{颗粒}}$ 时，所得到的 m 称之为绝对孔隙度。 $V_{\text{颗粒}}$ 为组成该岩石的颗粒总体积。

我们知道，砂岩颗粒和颗粒之间未为胶结物所充填的孔隙，有的却为胶结物所包围而形成和周围孔隙互不连通的“死孔隙”。另外有的孔隙周围可能全为微毛细管孔道所包围，这样的孔隙实则也相当于“死孔隙”，因为这样孔隙中的液体实际上很难流出来。

绝对孔隙度的孔隙体积包括了除颗粒体积外该岩石的全部体积。

除了绝对孔隙度以外，还有所谓“有效”孔隙度。“有效”孔隙度的孔隙体积可理解为不包括上述两种类型的“死孔隙”的体积和微毛细管孔道在内的体积。

另外还有所谓流动孔隙度。亦即在自然条件的压力差作用下，能为液体所流通的岩石孔隙体积与该岩石几何体积之比。这种孔隙度的概念在数量上是不确定的，其大小随压力差和液体的性质而改变。

經試驗証明，儲油砂岩的有效孔隙度和绝对孔隙度极其接近。

儲油砂岩的孔隙度在石油儲量計算上是一极其重要的参数。

一般儲油砂岩的孔隙度大約在10—25%左右。

石灰岩和白云岩的孔隙和砂岩不同，它們大多为溶洞和裂縫。

应该指出，岩石的孔隙度大并不等于该岩石孔道直径比较大。因为由无数小的孔道所组成的岩石孔隙总体积却可能很大，亦即孔隙度可能很大。反之亦然，少数的超毛细管孔道所组成的岩石其孔隙度却可能很小。

前面曾提到，岩石的孔道大小，直接关系到岩石渗透性的好坏。孔道大的，渗透性一定好。

岩石渗透性的好坏，通常用渗透率来表示。它表示岩石为液体所通过的能力。儲油岩石渗透率的大小，可根据达西定律，用試驗方法求得。达西定律可表示如下：

$$Q = K \frac{F(P_1 - P_2)}{\mu L}$$

則

$$K = \frac{Q \mu L}{F(P_1 - P_2)}$$

式中 Q ——在压力差为 $(P_1 - P_2)$ 大气压作用下的液体流量，厘米³/秒；

F 和 L ——分别为岩样的横截面积和长度，厘米²和厘米；

μ ——液体的绝对粘度，厘泊；

K ——岩石的渗透率，达西。

从上式可看出，岩石渗透率的概念可理解为：粘度为1个厘泊的液体，在压力差为1个大气压的作用下，所能通过面积为1厘米²和长度为1厘米的岩石的液体数量。该数量愈大，亦即渗透率愈大。当液体流量为1厘米³/秒时，其渗透率的大小称之为1个达西。

由于储油岩石渗透率一般都小于1个达西，因此，以达西作单位太大，故通常多取其千分之一作为渗透率的单位，称为千分达西。

应该指出，由于岩石的各向异性，所以垂直于层理方向的渗透率总是小于平行于层理方向的渗透率。

从上述渗透率的概念上可以看出，理论上绝对渗透率只是岩石的一种结构性质，它和液体性质无关。但实际上，液体和岩石颗粒表面的物理化学性质都将对渗透率有影响，其原因将在第三章内讲到。

当岩石为单相均质液体所充满并通过时，其渗透率称之为绝对渗透率。

当岩石孔隙中同时饱和有两种以上的液体或液气两相时，其中某一相的渗透率称之为该相的有效渗透率。例如，当井底压力低于饱和压力采油时，则在井底岩石孔隙中除油以外还有气体存在。此时石油通过井底岩石的渗透率称之为油的有效渗透率。

有效渗透率和绝对渗透率之比称为相对渗透率。

当有两相同时存在于岩石孔隙中时，某一相的相对渗透率和该相的饱和度有关系。当岩石孔隙中有油、气、水三相同时存在时，情况就更复杂了。这在地下流体力学中已讲过，这里不加赘述。

所谓油、气、水的饱和度，是指油、气、水在岩石总孔隙中各自所占的百分数。石油所占的百分数称为含油饱和度。水和气亦同。

第3节：岩石的机械性质

前面曾讲过，油藏内部保存有一定的压力，亦即通常所说的油层压力。其大小一般相当于油藏埋藏深度的静水压头。

另外，就油藏的岩层来讲，它还受到所谓“岩石压力”的作用。“岩石压力”可视为由上层岩石重量所呈现出的压力。

油藏在开发和打井以前，油藏处在力场平衡状态。但当打井和采油以后，油藏的力场平衡就遭到破坏。随井数的增加和采油工作中压差的改变，这种力场不平衡将不断地重新分配和建立新的平衡。由是它将引起储油岩层各种机械性质上的变化。

在采油所必须的压力降的作用下，由于岩石的弹性而使得油层岩石颗粒体积膨胀，则孔隙体积缩小，再加上其中油水体积的膨胀将使得利用液体和岩石的弹性能量而将油排挤到井底。尽管岩石和液体本身的压缩性很小，但当考虑到储油岩层整个系统的体积之大，上述弹性能量却成为一种不可忽视的一种驱油动力。

每当油井工作方式改变，则使得压力在油层中重新分配，由于岩石和液体的弹性而使得这种分配是逐渐地由井底向远处传播。采油工作中经常利用岩石和液体的这种导压特性来了解油井和油层的情况。

岩石弹性大小可用岩石的压缩系数来表示。压力每增加1大气压，岩石体积的缩小占原始体积的比例叫做岩石的压缩系数。它可表示如下式：